



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI  
Fakulta strojní



# Měření užitečného výkonu při podélném soustružení

## Bakalářská práce

*Studijní program:* B2301 – Strojní inženýrství  
*Studijní obor:* 2301R000 – Strojní inženýrství  
*Autor práce:* **Petr Zeman**  
*Vedoucí práce:* doc. Ing. Jan Jersák, CSc.





TECHNICAL UNIVERSITY OF LIBEREC  
Faculty of Mechanical Engineering ■

# Measuring the useful power in cylindrical turning

## Bachelor thesis

*Study programme:* B2301 – Mechanical Engineering  
*Study branch:* 2301R000 – Mechanical Engineering  
*Author:* **PetrZeman**  
*Supervisor:* doc. Ing. Jan Jersák, CSc.



Technická univerzita v Liberci  
Fakulta strojní  
Akademický rok: 2017/2018

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: Petr Zeman  
Osobní číslo: S17000205  
Studijní program: B2301 Strojní inženýrství  
Studijní obor: Strojní inženýrství  
Název tématu: Měření užitečného výkonu při podélném soustružení  
Zadávající katedra: Katedra obrábění a montáže

### Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Shrnutí poznatků o výkonu potřebném pro zajištění procesu soustružení.
2. Rešerše literárních poznatků o měření výkonu při soustružení.
3. Návrh metodiky experimentů pro měření výkonu při soustružení s použitím dynamometru Kistler, měřicího kufru QWII a třífázového analyzátoru výkonu.
4. Realizace experimentů.
5. Hodnocení poznatků o výkonu při soustružení.
6. Shrnutí a zhodnocení dosažených výsledků a vyvození závěrů.

Rozsah grafických prací:                      Obrázky, tabulky a grafy - dle potřeby  
Rozsah pracovní zprávy:                      Cca 30 - 40 stran textu.  
Forma zpracování bakalářské práce:    tištěná/elektronická  
Seznam odborné literatury:

KOCMAN, K., PROKOP, J. *Technologie obrábění*. 2. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM Brno, s.r.o., prosinec 2005. 270 s. ISBN 80-214-3068-0.

ŘASA, J., GABRIEL, V. *Strojírenská technologie 3 - 1. díl - Metody, stroje a nástroje pro obrábění*. 1. (2.) vyd. Praha: Scientia, spol. s r.o., 2000 (2005). 256 s. ISBN 80-7183-207-3 (ISBN 80-7183-337-1.).

BEO, J., MAŇKOVÁ, I. *Technologické a materiálové činitele obrábění*. Rec.: Batora, B. aj. 1. vyd. Košice: TU Košice, Strojnícka fakulta, 2004. 418 s. ISBN 80-7099-701-X.

DEGNER, W., LUTZE, H., SMEJKAL, E. *Spanende Formung, Theorie, Berechnung, Richtwerte*. 15. Auflage. München-Wien: Carl Hanser Verlag, 2002. 396 s. ISBN 3-446-22138-7.

KLOCKE, F., KÖNIG, W. *Fertigungsverfahren 1 - Drehen, Fräsen, Bohren*. 8. Auflage. Berlin, Heidelberg, New York: Springer-Verlag, 2008. 547 s. ISBN 978-3-540-23458-6.

SANDVIK Coromant, Sandviken: *Technická příručka obrábění - soustružení, frézování, vrtání, vyvrtávání, upínání nástrojů*. 2005. 601 s.

Vedoucí bakalářské práce:                      doc. Ing. Jan Jersák, CSc.

Katedra obrábění a montáže

Konzultant bakalářské práce:                      Ing. Stanislav Servinský, MBA

Katedra obrábění a montáže

Datum zadání bakalářské práce:                      5. března 2018

Termín odevzdání bakalářské práce:                      5. září 2019

prof. Dr. Ing. Petr Lenfeld  
dekan



doc. Ing. Jan Jersák, CSc.  
vedoucí katedry

V Liberci dne 5. března 2018

## Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé bakalářské práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li bakalářskou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé bakalářské práce a konzultantem.

Současně čestně prohlašuji, že tištěná verze práce se shoduje s elektronickou verzí, vloženou do IS STAG.

Datum:

Podpis:

## **Měření užitečného výkonu při podélném soustružení**

### **ANOTACE:**

Bakalářská práce se zabývá vyhodnocením vlivu vybraných technologických parametrů na užitečný výkon při soustružení. Užitečný výkon byl získán pomocí třech zařízení, která pracovala současně: měřicím kufrem, třífázovým analyzátozem výkonu DW 6092 a dynamometrem Kistler – type 9265B. Hlavním cílem této práce bylo tyto 3 měřicí metody porovnat a vyhodnotit vhodnost jejich použití při různých řezných podmínkách. Všechna měření byla provedena na univerzálním soustruhu SU 50/1500 - TOS Lipník, obráběcím nástrojem byl soustružnický nůž Pramet CTAPR 2020 K 16 s vyměnitelnou břitovou destičkou TPUN 160308-6640.

## **Measuring the useful power in cylindrical turning**

### **ANNOTATION:**

The bachelor thesis deals with evaluation of the influence of selected technological parameters on the useful power during turning. Useful power was obtained through three devices that worked simultaneously: a measuring trunk, three-phase DW 6092 power analyzer and a Kistler dynamometer – type 9265B. The main aim of this work was to compare these 3 measuring methods and evaluate the suitability of their use in different cutting conditions. All measurements were carried out on the universal lathe su 50/1500 - TOS Lipnik, with the Pramet Turning Tool CTAPR 2020 K 16 with replaceable edge plate TPUN 160308-6640 as a machining tool.

Klíčová slova : obrábění, soustružení, užitečný výkon.

Keywords: machining, turning, useful power.

Katedra obrábění a montáže

Evidenční číslo práce: **KOM 1299**

Jméno a příjmení: **Petr Zeman**

Vedoucí práce: doc. Ing. Jan Jersák CSc.  
Konzultant: Ing. Miloslav Ledvina, Ph.D.  
Ing Stanislav Servinský, MBA

Počet stran:	81
Počet příloh:	0
Počet tabulek:	15
Počet obrázků:	60
Počet diagramů:	14

PODĚKOVÁNÍ: Tímto děkuji vedoucímu bakalářské práce doc. Ing. Janu Jersákovi, CSc. a konzultantům Ing. Miloslavu Ledvinovi, Ph.D. a Ing. Stanislavu Servinskému, MBA za cenné připomínky a odborné rady při vypracování této bakalářské práce.



# Obsah

Seznam použitých zkratk a symbolů .....	12
1. Úvod .....	14
1.1. Cíle Bakalářské práce .....	15
2. Výkon a Energie v řezném procesu .....	16
2.1. Základní pojmy, definice .....	16
2.1.1. Definice obrábění.....	16
2.1.2. Charakteristika technologie obráběcího procesu .....	16
2.1.3. Soustružení.....	16
2.2. Energie při obrábění.....	18
2.2.1. Rozdělení energií v řezném procesu .....	18
2.2.2. Celková energie (práce) obrábění obecně, v soustavě obrobek – nástroj - stroj : .....	20
2.2.3. Tepelná bilance řezného procesu .....	20
2.2.4. Výkon při obrábění .....	22
2.2.5. Řezná síla.....	23
2.2.5.1. Aktivní a pasivní složka řezné síly .....	23
2.2.5.2. Rozklad řezné síly, vliv nástrojových úhlů.....	25
2.2.5.3. Hlavní složky řezné síly.....	26
2.2.5.4. Průběh řezné síly, dynamika řezné síly .....	26
2.2.5.5. Parametry ovlivňující velikost řezné síly.....	28

2.2.5.6. Měrná řezná síla, měrný řezný odpor .....	35
2.2.6. Stanovení řezných sil při obrábění.....	37
2.2.6.1. Stanovení řezných sil výpočtem .....	38
2.2.6.2. Stanovení řezných sil měřením.....	40
2.3. Měření řezné síly a užitečného výkonu .....	43
3. Návrh Metodiky Měření .....	44
3.1. Volba nezávislých parametrů měření .....	44
3.2. Parametry Obráběcího stroje- Soustruhu .....	44
3.1. Parametry nástroje – soustružnického nože.....	46
3.2. Použité Měřicí přístroje .....	47
3.2.1. Měřicí kufr .....	47
3.2.2. Třífázový analyzátor výkonu DW – 6092 .....	48
3.2.3. Dynamometr Kistler Type 9265B.....	49
3.3. Měřené hodnoty pro jednotlivé nezávislé parametry.....	50
3.3.1. Nezávislý parametr řezná rychlost $v_c$ .....	50
3.3.2. Nezávislý parametr posuv $f$ .....	51
3.3.3. Nezávislý parametr hloubka řezu $a_p$ .....	51
3.4. Postup odečtu měřených hodnot.....	51
3.4.1. Odečet hodnot - Měřicí kufr .....	52
3.4.2. Odečet hodnot – 3-fázový analyzátor .....	52
3.4.3. Odečet hodnot - Dynamometr Kistler.....	52

3.5. Zpracování naměřených hodnot.....	54
3.5.1. Postup výpočtu, příklad výpočtu .....	56
4. Realizace experimentů, Měření .....	60
4.1. Stroj.....	60
4.2. Nástroj.....	60
4.3. Obrobek .....	61
4.4. Měřicí přístroje .....	62
4.4.1. Měřicí kufr .....	62
4.4.2. 3-fázový analyzátor.....	62
4.4.3. Dynamometr Kistler .....	63
4.5. Definice rozsahu měřených hodnot .....	63
4.6. Přehled a vyhodnocení naměřených hodnot .....	64
4.6.1. Měření závislosti $P_{už}$ na řezné rychlosti .....	64
4.6.2. Měření závislosti $P_{už}$ na posuvu.....	64
4.6.3. Měření závislosti $P_{už}$ na hloubce řezu.....	65
4.6.4. Grafické znázornění naměřených hodnot .....	66
5. Vyhodnocení, závěr .....	75
6. Seznam použité literatury .....	80

## SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

$a$	[mm]	Hloubka záběru
$a_p$	[mm]	Hloubka řezu
$A_D$	[mm <sup>2</sup> ]	Průřez třísky
$b$	[mm]	Šířka záběru
$E$	[J]	Celková energie obrábění
$E_A$	[J]	Energie aktivní
$E_c$	[J]	Celková práce řezání
$E_D$	[J]	Deformační energie
$E_{DE}$	[J]	Energie pružných (elastických) deformací
$E_{DP}$	[J]	Energie plastických deformací
$E_{DPP}$	[J]	Podíl energie plastických deformací obrobeného povrchu na energii pasivní
$E_f$	[J]	Práce posuvu
$E_P$	[J]	Energie pasivní
$E_T$	[J]	Energie třecí
$E_{TI}$	[J]	Energie vnitřního tření
$E_{TP}$	[J]	Podíl energie tření mezi hřbetem a obrobenou plochou na energii pasivní
$f$	[mm.ot <sup>-1</sup> ]	Posuv, posuv na otáčku
$F$	[N]	Výsledná (celková) řezná síla
$F_1$	[N]	Aktivní síla na čele nástroje
$F_2$	[N]	Pasivní síla na hřbetu nástroje
$F_c$	[N]	Tangenciální složka hlavní řezné síly
$F_e$	[N]	Průmět výsledné řezné síly $F$ do směru vektoru výsledného řezného pohybu
$F_f$	[N]	Složka posuvové řezné síly
$F_{OK}$	[N]	Okamžitá velikost řezné síly
$F_p$	[N]	Složka přísuvové řezné síly
$F_S$	[N]	Složka řezné síly působící ve střižné rovině
$F_{SN}$	[N]	Složka řezné síly normálová, působící na střižnou rovinu
$l$	[m]	Délka obráběné plochy, dráha
$M_k$	[N.m]	Krouticí moment

$P$	[W]	Výkon
$P_0$	[W]	Příkon stroje za chodu naprázdno
$P_e$	[W]	Příkon za chodu stroje
$P_c$	[W]	Výkon hlavního řezného pohybu
$P_f$	[W]	Výkon posuvu
$P_p$	[W]	Výkon přísuvu
$P_{už}$	[W]	Užitečný výkon
$Q_n$	[J]	Teplo odvedené nástrojem
$Q_o$	[J]	Teplo odvedené obrobkem
$Q_{pd}$	[J]	Teplo vzniklé v oblasti plastických deformací při tvorbě třísky
$Q_{pr}$	[J]	Teplo odvedené řezným prostředím
$Q_t$	[J]	Teplo odvedené třískou
$Q_\alpha$	[J]	Teplo vzniklé v oblasti tření hřbetu nástroje po přechodové ploše obrobku
$Q_\gamma$	[J]	Teplo vzniklé v oblasti tření třísky po čele nástroje
$v_e$	[m/min]	Vektor výsledného řezného pohybu
$v_f$	[m/min]	Posuvová rychlost
$v_p$	[m/min]	Přísuvová rychlost
$v_c$	[m/min]	Rychlost hlavního řezného pohybu
$t$	[°C]	Teplota prostředí
$t_{AS}$	[s]	Jednotkový strojní čas
$t_{n-1}$	[-]	Studentův koeficient
$\alpha$	[°]	Úhel hřbetu
$\gamma_0$	[°]	Úhel čela
$\kappa$	[°]	Úhel nastavení řezného nástroje
$\omega$	[°]	Úhel mezi vektorem rychlosti a síly při soustružení
$\eta$	[%]	Účinnost stroje
$x, y, z$	[-]	Osy souřadného systému
TUL		Technická univerzita v Liberci

# 1. ÚVOD

Ve strojírenské výrobě se lze jen těžko nalézt strojní součásti, při jejichž výrobě by nebyly použity některé způsoby obrábění. Tento fakt ukazuje, jak velký význam proces obrábění v současné době má [1].

Se stále se zvyšujícím tlakem na optimalizaci výrobních procesů se dostává do popředí i nutnost přesně určit náklady na vstupní energie v rámci jednotlivých částí výrobního procesu. Správné určení množství vstupní energie má význam pro:

1. kalkulaci přímých nákladů na energii,
2. dostatečné dimenzování přívodů a rozvodů v rámci výrobního závodu i menších výrobních jednotek,
3. dostatečné dimenzování výkonu (příkonu) strojů pro danou výrobní operaci.

K určení skutečných hodnot spotřebovaných energií, resp. výkonů, bylo vyvinuto několik výpočtových i experimentálních metod. Tyto teoretické metody často vycházejí z experimentálně naměřených hodnot při daných řezných podmínkách. Proto je nutné umět hodnoty vstupních energií změřit s maximální přesností a spolehlivostí.

Obecně lze změřit užitečný výkon při obrábění přímo pomocí různých druhů a konfigurací wattmetrů nebo nepřímo pomocí zařízení pro měření řezných sil. Jednotlivé způsoby měření vykazují v závislosti na vstupních podmínkách různé míry nepřesností a zkreslení výsledků.

Na TUL jsou používány k měření užitečného výkonu následující metody.

## **Metody pro přímé měření užitečného výkonu**

- Měření výkonu měřicím kufrem
- Měření výkonu 3-fázovým analyzátozem

## **Metody pro nepřímé měření užitečného výkonu**

- Měření řezné síly dynamometrem Kistler

Hlavním cílem této bakalářské práce je tyto metody vzájemně porovnat a vyhodnotit jejich vhodnost použití při různých řezných podmínkách. Dále bylo stanoveno i několik dílčích cílů, definovaných v následující kapitole.

## 1.1. CÍLE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

- 1) Porovnání jednotlivých metod měření na základě naměřených výsledků a jejich vhodnosti použití pro měření užitečného výkonu při soustružení.

Jedná se o níže uvedené metody.

Metody pro přímé měření užitečného výkonu

- Měření výkonu měřicím kufrem
- Měření výkonu 3-fázovým analyzátozem

Metodu pro nepřímé měření užitečného výkonu

- Měření řezné síly dynamometrem Kistler

- 2) Volba hlavních nezávislých parametrů, ovlivňujících velikost výkonu při obrábění a jejich rozsahu pro měření.
- 3) Změření závislosti výkonu při soustružení na zvolených řezných parametrech, jednotlivými metodami, používanými na TUL.
- 4) Zpracování algoritmu pro zpracování naměřených hodnot v prostředí programu MS Excel pro použití při opakovaných měřeních.
- 5) Shrnutí naměřených výsledků, vyvození závěrů, s ohledem na teoretické poznatky.

## **2. VÝKON A ENERGIE V ŘEZNÉM PROCESU**

### **2.1. ZÁKLADNÍ POJMY, DEFINICE**

#### **2.1.1. DEFINICE OBRÁBĚNÍ**

Obrábění je část výrobního procesu, který je založen na využití energie a při kterém činností stroje, strojního vybavení a nástroje, tzn. odebíráním určitého objemu materiálu řezným nástrojem, vzniká obrobek žádaného tvaru, rozměrů a jakosti povrchu [3](dle ČSN 02 0010).

#### **2.1.2. CHARAKTERISTIKA TECHNOLOGIE OBRÁBĚCÍHO PROCESU**

Při obrábění dochází k oddělování částic materiálu obrobku břitem nástroje. Vlastní proces fyzikálně-mechanického oddělování materiálu obrobku je specifikován jako řezání, respektive řezný proces. V závislosti na způsobu oddělování materiálu rozlišujeme řezný proces kontinuální (soustružení, vrtání, vyvrtávání), nekontinuální (hoblování, obrážení) a cyklický (frézování, broušení). Reálný řezný proces probíhá za určitých řezných podmínek, které jsou součástí obráběcích podmínek [2].

Oddělování materiálu během obrábění je složitý fyzikální proces. Při oddělování materiálu ve formě třísky dochází nejprve pružným a následně k plastickým deformacím. Během tohoto procesu dochází k vnitřnímu tření v oblasti primárních a sekundárních plastických deformací a k vnějšímu tření na stykových místech nástroje s třískou a obrobenou plochou. Podrobnostmi tohoto procesu se zabývá příslušná literatura, např. [1][3][4][2].

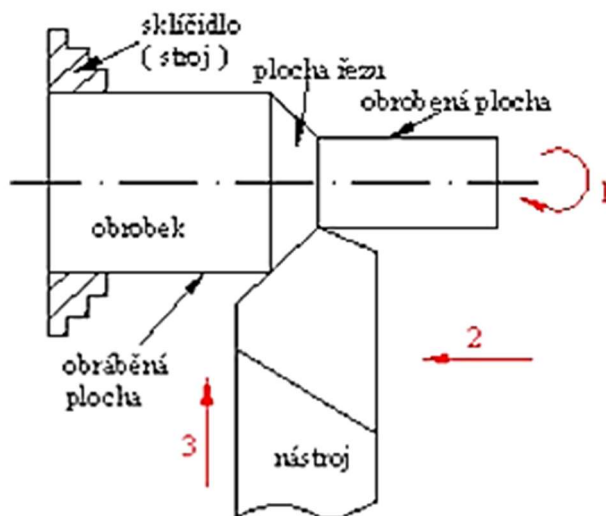
#### **2.1.3. SOUSTRUŽENÍ**

Soustružení je metoda třískového obrábění sloužící k obrábění vnitřních i vnějších válcových ploch. Jedná se o metodu, při které se používá nástroj, soustružnický nůž, s jedním definovaným hrotem.

Hlavní řezný pohyb je pohyb rotační (1) a vykonává ho obrobek. Vedlejší řezné pohyby jsou přímočaré posuvné a jsou vykonávány nástrojem, tzv. posuv (2) a přísuv (3) –

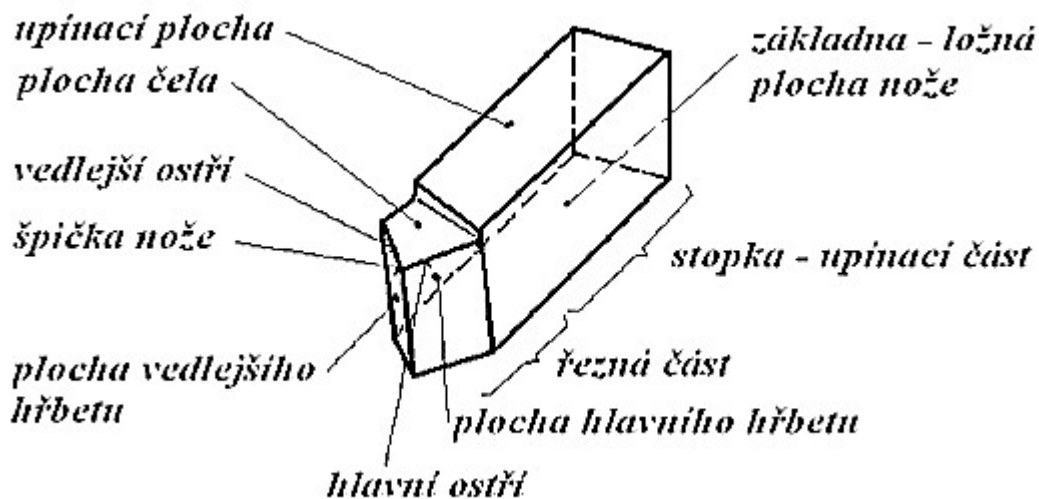


viz. obrázek č. 1. Ve výjimečných případech může vykonávat hlavní řezný pohyb i nástroj, např. při soustružení pomocí vyvrtávací tyče.



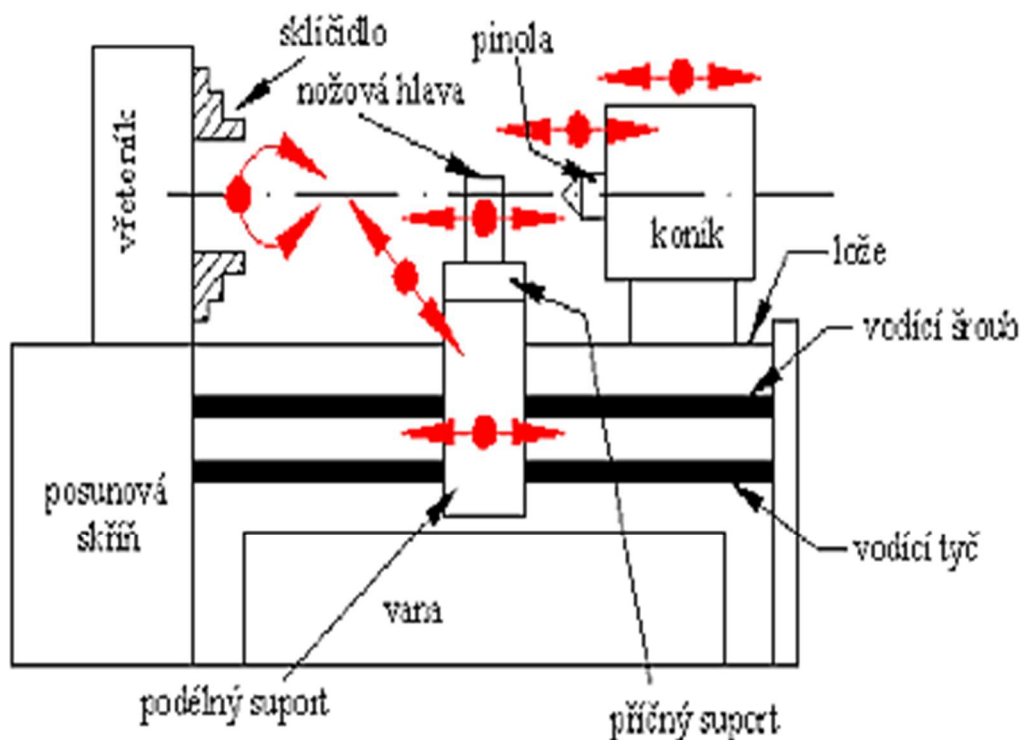
**Obr. 1 Kinematika řezného pohybu při soustružení [14]**

Řezným nástrojem je v případě soustružení soustružnický nůž, vyobrazený na obr. 2, jehož činnou částí je břit. Má tvar klínu ohraničeného plochou čela, po které odchází tříska a plochou hřbetu. Průsečnice ploch čela a hřbetu se nazývá ostří. Řezná část nástroje má zpravidla ostří hlavní a vedlejší. Soustružnický nůž je upínán, zpravidla do nožové hlavy, pomocí šroubů za upínací plochu.



**Obr. 2 Soustružnický nůž, včetně popisu hlavních částí [14]**

Strojem, na němž soustružíme je soustruh a nejběžnějším typem soustruhu je soustruh univerzální, jehož schematické vyobrazení, včetně základních částí je na obr. 3.



**Obr. 3 Schéma univerzálního soustruhu, včetně popisu hlavních částí [14]**

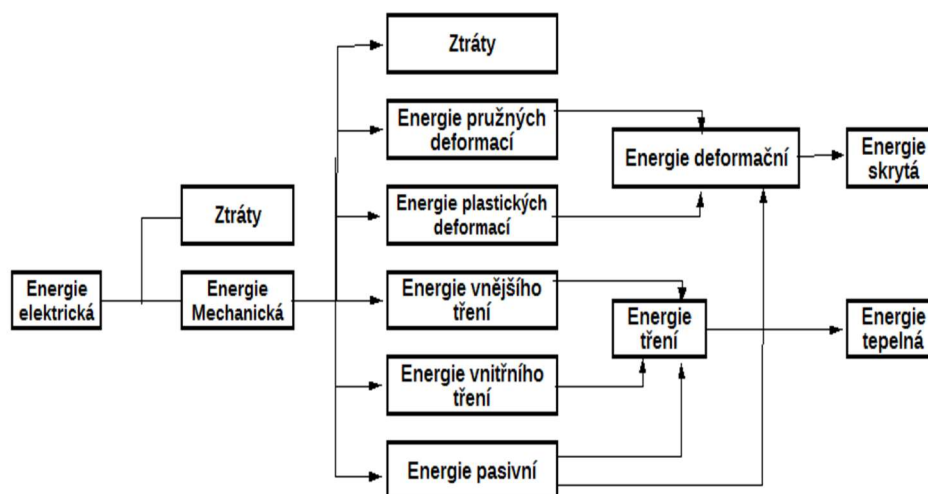
Podrobnější popis technologie soustružení, rozdělení strojů, nástrojů apod. lze dohledat v příslušné literatuře. Úkolem této bakalářské práce je zabývat se měřením výkonu při soustružení, tzn. z pohledu energií.

## **2.2. ENERGIE PŘI OBRÁBĚNÍ**

### **2.2.1. ROZDĚLENÍ ENERGIÍ V ŘEZNÉM PROCESU [3]**

K zajištění plynulosti tvorby třísky, musí být trvale dodáván dostatek energie. Tato energie při obrábění je získávána z pohonné jednotky stroje, zpravidla z elektromotoru, kde dochází k transformaci elektrické energie na energii mechanickou, jež je potřeba k procesu obrábění.

Tato energie není spotřebována pouze k vlastnímu obrábění, část z ní je současně spotřebovávána k vlastnímu pohybu stroje. Schematicky je transformace znázorněna na obr. 4.



**Obr. 4 Transformace a rozdělení energie v řezném procesu, dle [3]**

**Energie pružných deformací ( $E_{DE}$ )** - je s ohledem na velmi malý objem materiálu, který je pružně deformován, velmi malá. Spotřeba této energie nutně doprovází tvorbu třísky.

**Energie plastických deformací ( $E_{DP}$ )** – ji rozhodující pro oddělení a tvorbu třísky. Jedná se o energii spotřebovávanou na vytvoření takového napětí v materiálu, za pomoci pohybu břitu nástroje vůči obrobku (případně obrobku vůči břitu nástroje), při kterém dojde k překročení deformačního odporu a ke vzniku kluzů v jednotlivých elementech třísky.

**Energie tření ( $E_T$ )**- se spotřebuje na odvádění třísky z místa řezu. Její velikost je závislá na součiniteli tření. Tření lze rozlišit na tření mezi třískou a nástrojem a tření vyvolané deformačními kluzy uvnitř materiálu třísky. Z tohoto důvodu lze rozlišit i 2 způsoby pohybu třísky po čele.

V prvním případě se na břitu nevytvoří dostatečný nárůstek a dojde tedy pouze ke spotřebě energie vnitřního tření ( $E_{TI}$ ), ve druhém případě dochází ke vzniku sekundární plastické deformace v důsledku vytvoření váznoucí vrstvičky na čelo nástroje a dojde k uplatnění energie vnějšího tření ( $E_{TE}$ ).

**Energie pasivní ( $E_p$ )** - se spotřebovává na činnosti, které nejsou bezprostředně spojeny s tvorbou třísky a jejím odváděním. Je tvořena energií potřebnou na překonání tření mezi hřbetem nástroje a obrobenou plochou a energií využitou na deformaci povrchové vrstvy materiálu.

**Lze tedy sestavit energetické rovnice:**

$$E = E_{DP} + E_{DE} + E_{TE} + E_{TI} + E_P \quad (1)$$

$$E_D = E_{DP} + E_{DE} + E_{DP} \quad (2)$$

$$E_T = E_{TE} + E_{TI} + E_{TP} \quad (3)$$

$$E_A = E_{DP} + E_{DE} + E_{TE} + E_{TI} \quad (4)$$

$$E_P = E_{DPP} + E_{TP} \quad (5).$$

### 2.2.2. CELKOVÁ ENERGIE (PRÁCE) OBRÁBĚNÍ OBECNĚ, V SOUSTAVĚ OBROBEK – NÁSTROJ - STROJ : [2] [4]

Práce řezného procesu zahrnuje ekvivalentně s kap. 2.2.1. práci pružných a plastických deformací v oblasti tvoření třísky, práci tření třísky po čele nástroje, práci tření hřbetu nástroje po obrobené ploše a práci pasivní (disperzní)  $E_P$ , která je spojena s rozdělením materiálu a souvisí s jeho povrchovou energií. Její podíl na celkové práci bývá menší než 1%, proto bývá často zanedbávána.

**Celková práce řezání**

$$E_C = F_C \cdot l = F_C \cdot v_c \cdot t_{AS} \quad [J] \quad (6)$$

Tento tvar platí pro obrábění válcové plochy konstantní rychlostí., pro případ soustružení např. kuželové plochy je třeba použít obecný diferenciální tvar.

$$E_C = \int_0^t F_C(t) \cdot v_c(t_{AS}) dt \quad [J] \quad (7)$$

**Práce posuvu**

$$E_f = F_f \cdot v_f \cdot t_{AS} \quad [J] \quad (8)$$

**Práce řezného procesu**

$$E_e = E_C + E_f \quad [J] \quad (9)$$

### 2.2.3. TEPELNÁ BILANCE ŘEZNÉHO PROCESU [4] [13]

Během obráběcího procesu se téměř veškerá práce řezání transformuje v teplo.

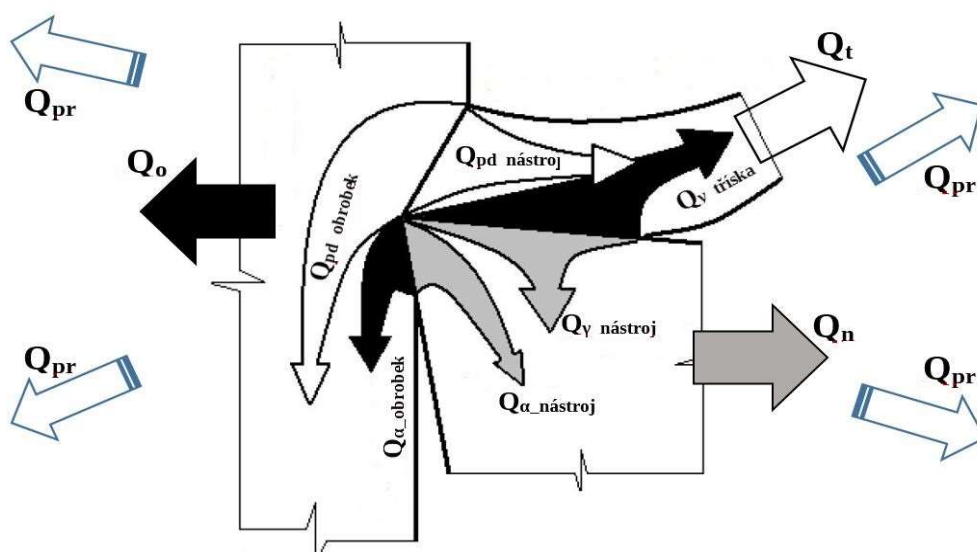
Teplo řezného procesu  $Q_e$ , vzniklé při odebrání určitého množství materiálu, je přibližně rovno práci řezného procesu  $E_e$ , takže  $Q_e = E_e$ .

Hlavní zdroje tepla jsou v oblasti plastických deformací při tvorbě třísky, v oblasti tření třísky po čele nástroje a v oblasti tření hřbetu po obrobené ploše, proto platí:

$$Q_e = Q_{pd} + Q_\gamma + Q_\alpha \quad [J] \quad (10).$$

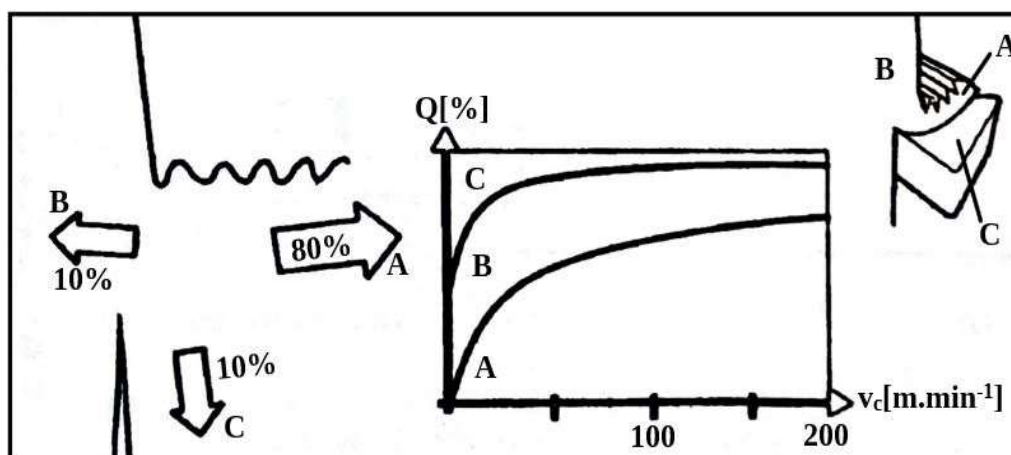
Vzniklé teplo řezného procesu  $Q$  [J] je odváděno do jednotlivých prvků obráběcího systému, viz obr. 5 :

$$Q_e = Q_t + Q_o + Q_n + Q_{pr} \quad [J] \quad (11).$$



Obr. 5 Vznik a šíření tepla v zóně řezání [13]

Podíl jednotlivých odváděných složek tepla řezného procesu do třísky, obrobku, nástroje a prostředí závisí na tepelné vodivosti materiálů obrobku a nástroje, na řezných podmínkách (především řezné rychlosti, viz obr. 6), řezném prostředí (způsobu chlazení a mazání) a na geometrii břitu řezného nástroje.



Obr. 6 Obecné rozdělení odváděného tepla v závislosti na řezné rychlosti  $v_c$  [2]

Největší část tepla vzniklého při obrábění je v ideálním případě odváděna ze zóny řezání třískou. Teplota třísky zatěžuje řezný nástroj jen po dobu, kdy je s ním v kontaktu. Nejvyšší množství tepla vzniká v rovině stříhu. Proto má velikost a jakost(tvar) místa styku mezi třískou a nástrojem vliv přímo na výkon řezného procesu.

Teplo vznikající v oblasti hřbetu, kde se dráhy nástroje a opracovávaného obrobku rozdělují, by mělo být udržováno na co možná nejnižších hodnotách. Toto lze zajistit volbou dostatečně velkého úhlu hřbetu. Je ovšem žádoucí zamezit jeho výraznému opotřebení, díky kterému se úhel hřbetu zmenšuje, a mohou zde vznikat vysoké teploty, které mají za následek rychlý lom břitu.

Pomocí moderních břitových destiček je možné proces obrábění optimalizovat tak, aby byl převod tepla do břitu minimalizován.

Příklad rozdělení odváděného tepla vzniklého při obrábění je na obr. 5.

#### 2.2.4. VÝKON PŘI OBRÁBĚNÍ [2]

Obráběcí stroj musí pro realizaci své funkce obrábění disponovat dostatečným výkonem. Při zanedbání ztrát odpovídá tento výkon celkové práci řezného procesu  $E_C$ , spotřebované za časovou jednotku. Platí:

$$P_{už} = E_C \cdot t_{AS}^{-1} \quad [W] \quad (12),$$

a po zobecnění:

$$P = F \cdot \frac{l}{t_{AS}} = F \cdot v \quad [W] \quad (13).$$

Skutečně užitý, tzn užitečný výkon při obrábění lze stanovit z výrazu:

$$P_{už} = F_e \cdot v_e \quad [W] \quad (14).$$

Vyjdeme-li z rozkladu sil do tří základních směrů pohybů, potom s použitím odpovídajících rychlostí těchto pohybů můžeme psát rovnici:

$$P_{už} = F_c \cdot v_c + F_p \cdot v_p + F_f \cdot v_f \quad [W] \quad (15).$$

Výkon motoru stroje  $P_e$  má být větší o ztráty v převodech, vyjádřené účinností  $\eta$ .

Má-li stroj společný motor i pro pohon posuvového mechanismu, pak musí mít výkon vyšší o výkon Posuvu  $P_f$ .

$$P_e = \frac{P_{už}}{\eta} + P_f \quad [W] \quad (16)$$

Z tohoto důvodu je třeba při měření užitečného výkonu přímými metodami vycházet ze vztahu:

$$P_{už} = P_e - P_0 \quad [W] \quad (17)$$

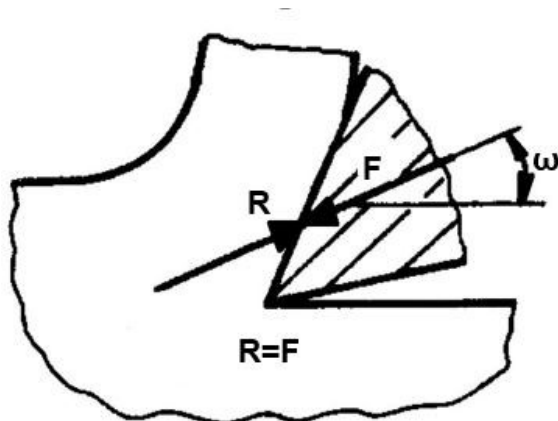
Z výše uvedených rovnic (12-16) vyplývá zřejmá závislost řezného výkonu na řezných silách a řezných rychlostech, proto se budeme v této bakalářské práci nadále zabývat převážně těmito veličinami, s hlavním důrazem na řeznou sílu  $F_c$ .

### 2.2.5. ŘEZNÁ SÍLA [2] [4]

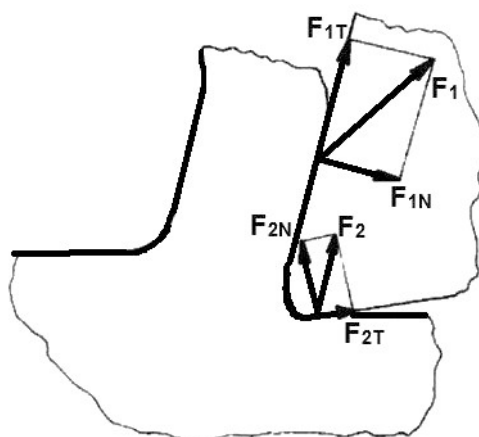
V souladu se vztahy pro energie uvedenými v kapitolách 2.2.2 a 2.2.3 musí být i vztahy pro veličiny, díky kterým k obrábění dochází a z nichž je celková energie odvozena, tzn. celková řezná síla  $F$  [N], řezná rychlost  $v$  [ $m \cdot s^{-1}$ ] a čas obrábění  $t$  [s]. Aby docházelo k oddělování třísky, musí na nástroj působit výsledná řezná síla  $F$  [N] jako nositelka energie potřebné pro obrábění. Při vnikání břitu nástroje do materiálu klade tento odpor  $R$  [N], který musí být překonán výslednou řeznou silou  $F$  [N] (obr. 7). Tím vzniknou aktivní složky síly  $F_1$  [N], které se přímo podílejí na tvorbě a odvedení třísky z místa řezu (obr.8). Současně se však vytvoří podmínky pro vznik pasivních sil  $F_2$  [N], které nutně proces doprovázejí.

#### 2.2.5.1. AKTIVNÍ A PASIVNÍ SLOŽKA ŘEZNÉ SÍLY [2] [4]

Výsledná řezná síla  $F$  je výslednicí dvou složek, aktivní  $F_1$  a pasivní  $F_2$  dle obr. 9. Aktivní složka řezné síly  $F_1$  působí na čele v úseku A-B, v oblasti styku třísky s čelem. Pasivní složka  $F_2$  působí na hřbetu v úseku B-C, v oblasti styku hřbetu břitu s plochou řezu. V bodě B dochází k dělení obráběného materiálu. Síla  $F_2$  je přibližně pro hloubku záběru  $a > 0,05$  mm menší než síla  $F_1$ . Je-li hloubka záběru  $a \leq 0,05$  mm, může být síla  $F_2$  větší než síla  $F_1$ .

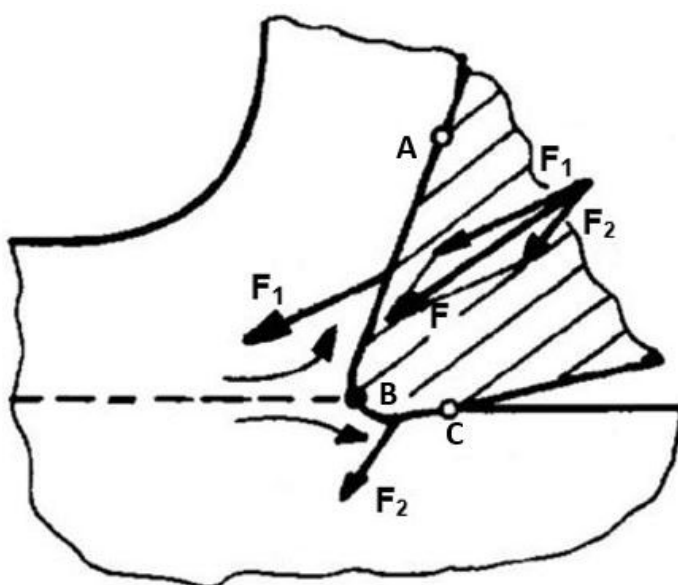


Obr. 7 Rovnováha sil při obrábění [4]



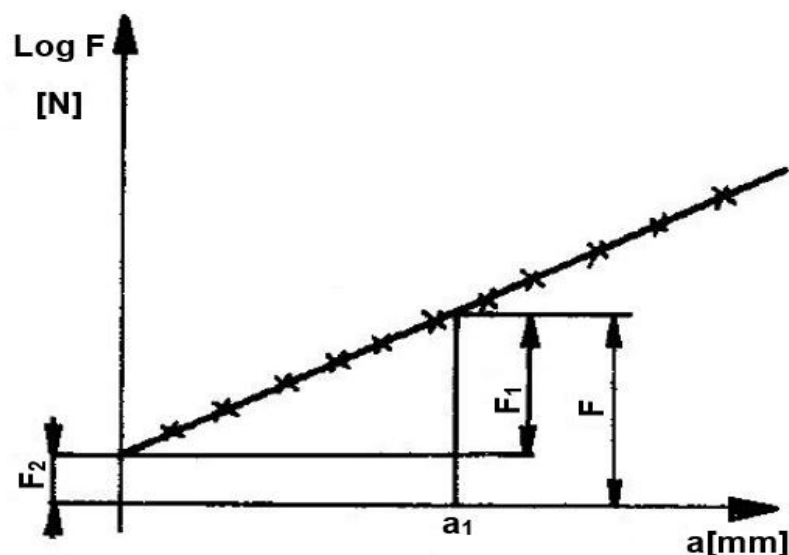
Obr. 8 Aktivní a pasivní složka řezné síly [4]

Experimentálně lze velikost síly  $F_2$  stanovit tak, že stanovíme velikost síly při nulové hodnotě tloušťky odřezávané vrstvy. To lze provést např. tak, že závislost  $F = f(a)$  vyneseme do logaritmických souřadnic dle obr. 10 a proložíme přímkou do hodnoty  $a = 0$ , v tomto bodě lze následně odečíst hodnotu velikosti síly  $F_2$ . (obr. 10) [4]



Obr. 9 Aktivní a pasivní složka řezné síly [4]

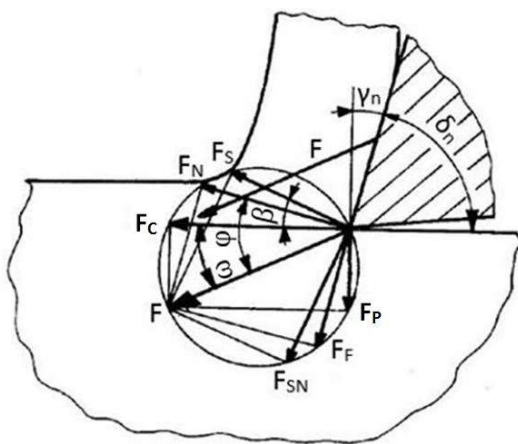




Obr. 10 Experimentální určení pasivní řezné síly - závislost  $F_2=f(a)$  [4]

#### 2.2.5.2. ROZKLAD ŘEZNÉ SÍLY, VLIV NÁSTROJOVÝCH ÚHLŮ [4]

Řeznou sílu  $F$  i její složky  $F_1$  a  $F_2$  lze rozložit do složek, např. dle (obr. 11). Působí síla  $F$  je zde posunuta do ostří, vrcholy vektorů jednotlivých složek řezné síly a působí  $F$  leží na společné kružnici, což umožňuje snadný přepočet pomocí úhlů  $\omega$ ,  $\varphi$ ,  $\beta$ ,  $\gamma_n$ ,  $\delta_n$ , pomocí systému pravoúhlých trojúhelníků, dle obr. 11 [4].



$F_S$  – složka řezné síly působící ve střižné rovině

$F_{SN}$  – složka řezné síly normálová, působící na střižnou rovinu

$F_C$  – tangenciální složka řezné síly

$F_P$  – radiální složka řezné síly

$F_N$  – normálová složka řezné síly, kolmá na rovinu čela

$F_F$  – tečná složka řezné síly v rovině čela

Obr. 11 [4] - Složky řezné síly

Složky síly  $F$  znázorněné na obr. 8 odpovídají silám při tzv. ortogonálním řezání, při kterém je ostří kolmé na směr řezného pohybu. Toto se uplatňuje např. při hoblování, zapichování a protahování.

### 2.2.5.3. HLAVNÍ SLOŽKY ŘEZNÉ SÍLY [4]

Vztahy pro přepočet všech jednotlivých sil z obr. 11 lze najít v příslušné literatuře, např. [2] [4]. Pro potřeby technické praxe lze v naprosté většině případů vystačit se silami ve směru hlavních rovin, tzn.  $F_f$ ,  $F_p$ ,  $F_c$ , viz obr. 12.

Tangenciální (hlavní) složka řezné síly  $F_c$  působí ve směru hlavního řezného pohybu, radiální (přisuvová) složka  $F_p$  působí ve směru kolmém k ose obrobku (ve směru nástroje), axiální (posuvová) síla  $F_f$  působí ve směru osy obrobku (kolmo k nástroji). Tyto 3 složky jsou navzájem kolmé a platí pro ně vztah:

$$F = \sqrt{F_f^2 + F_p^2 + F_c^2} \quad [N] \quad (18).$$

Poměr velikosti jednotlivých složek je dán především technologií a geometrií nástroje. Největší význam ze všech složek řezné síly má její tangenciální (hlavní) složka řezné síly. Je základem pro formulaci omezujících podmínek při optimalizaci řezných podmínek, určuje efektivní výkon obrábění apod. Radiální (přisuvová) složka je zachycována tuhostí soustavy stroj-nástroj-obrobek a vyvolává deformace tohoto systému. Spolu s tangenciální složkou je příčinou nepřesnosti výroby, resp. chvění při obrábění. Složka axiální má relativně nejmenší význam. Tvoří rozhodující část posuvové síly.

Typický rozklad řezné síly na složky je pro soustružení na obr. 9. Poměr velikostí složek řezné síly  $F_c : F_p : F_f$  je např. pro  $\kappa_r = 45^\circ$ ,  $\delta_0 < 90^\circ$ ,  $\lambda_s = 0^\circ$  a  $b:a > 5$ , tzn. při běžných podmínkách je poměr přibližně  $F_c : F_p : F_f = 1 : 0,4 : 0,25$ .

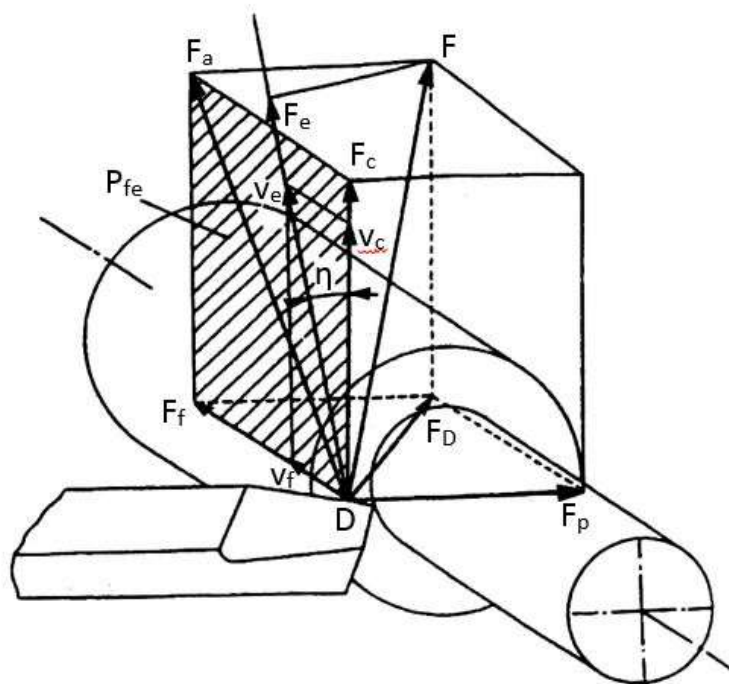
### 2.2.5.4. PRŮBĚH ŘEZNÉ SÍLY, DYNAMIKA ŘEZNÉ SÍLY [1] [2] [4]

Řezná síla je dynamickým jevem. Během obrábění kolísá v závislosti na čase její velikost okamžitá  $F_{OK}$  i za konstantních řezných podmínek. Je to způsobeno drsností obráběné plochy, rozptylem mechanických vlastností obráběného materiálu, mechanikou tvorby třísky apod. Průběh okamžité velikosti řezné síly je znázorněn na obr. 13 [4].

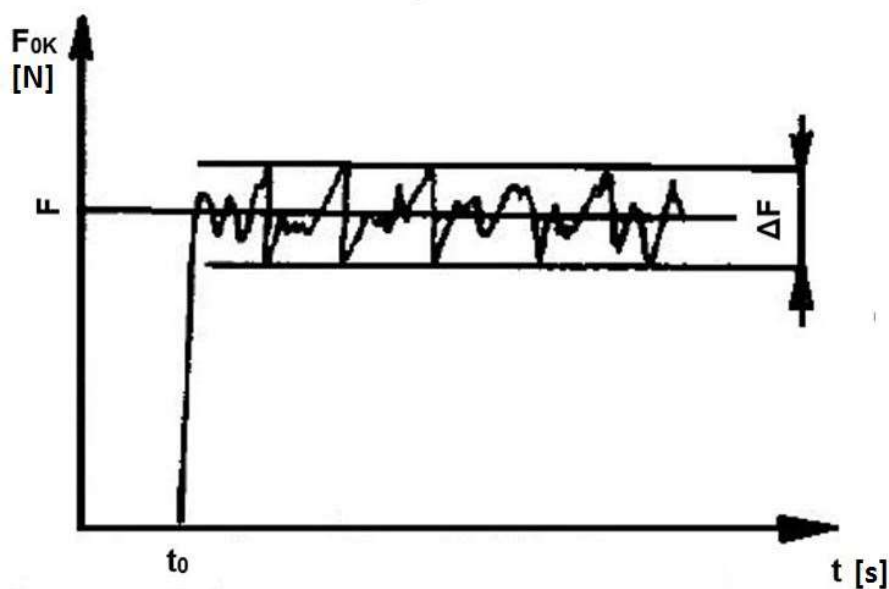
V okamžiku zajetí břitů nástroje do záběru v čase  $t_0$  začne velikost řezné síly kolísat okolo své střední hodnoty. Rozptyl velikosti okamžité řezné síly  $F_{OK}$  je dán velikostí  $\Delta F$ , který činí řádově několik procent hodnoty  $F$  při obrábění běžných povrchů a běžných homogenních technických materiálů. Ve výjimečných případech může být rozptyl hodnot  $F_{OK}$  až v rozmezí  $\pm 20 \%$ , a to i při řezání (obrábění) za stálých řezných podmínek.

Toto bývá způsobeno především rozptylem mechanických vlastností obráběného (testovaného) materiálu a mechanikou tvorby třísky. Příčinou extrémního rozptylu  $F_{OK}$  může být také např. výrazná nehomogenita materiálu nebo nerovnoměrná hloubka třísky.

;



Obr. 12 Rozklad řezné síly při soustružení [2]



Obr. 13 Průběh řezné síly během řezného procesu [4]

### 2.2.5.5. PARAMETRY OVLIVŇUJÍCÍ VELIKOST ŘEZNÉ SÍLY [1]

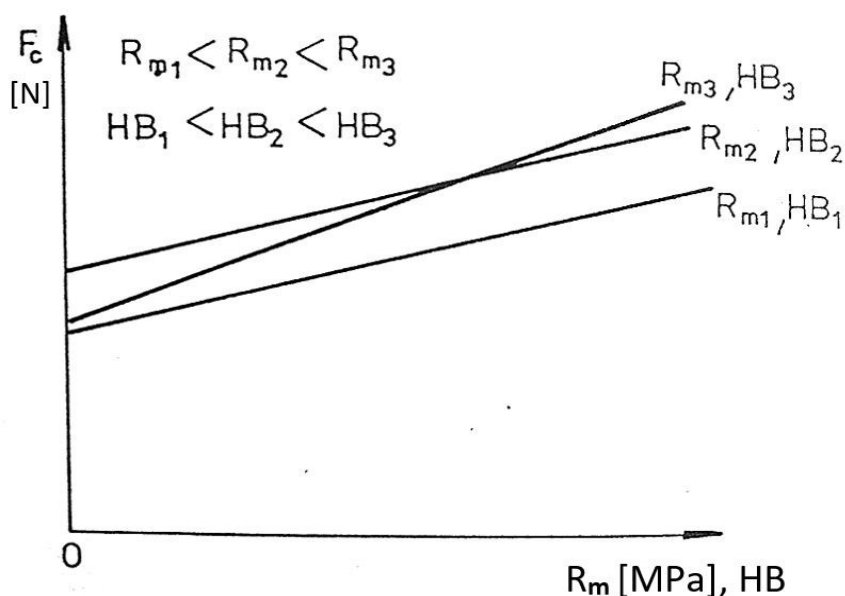
#### Pevnost a tvrdost obráběného materiálu

Při obrábění různých druhů materiálu za stálých řezných podmínek vznikají rozdílné řezné síly. Příčinou jsou různé fyzikální a chemické vlastnosti jednotlivých materiálů. V obecné rovině lze prohlásit, že stoupající pevnost v tahu, případně tvrdost, způsobuje vzrůst řezné síly. Schematicky to znázorňuje graf na obr. 14, pro který byly jako nezávislé proměnné vybrány typické veličiny obráběného materiálu  $R_m$  a HB.

Pro pevnost v tahu daného materiálu a pro řeznou sílu neplatí přímá úměra. Vyplývá to ze skutečnosti, že zatímco pevnost zkoumaných materiálů se pohybovala v rozmezí  $R_m = 400\text{--}1400$  MPa (poměr 1:3,5), tak rozdíl maximální řezné síly se pohyboval v rozmezí  $\pm 15\text{--}20\%$ .

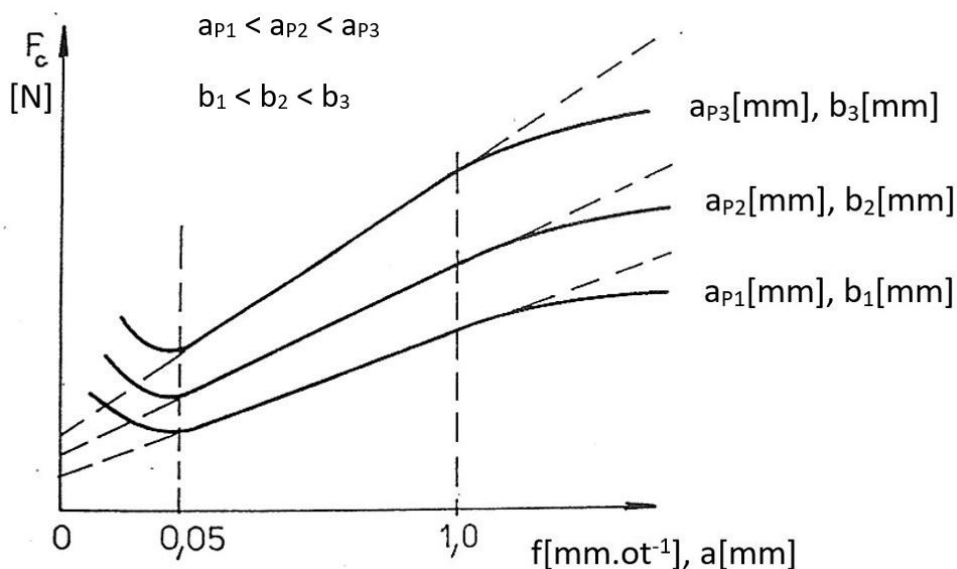
#### Vliv posuvu

Posuv  $f$ , resp. hloubka záběru  $a_p$  jsou veličiny, které mají mimořádný vliv na velikost řezné síly. Náznorně to zobrazuje graf na obr. 15. Přibližně lineární průběh řezné síly se odklání při vyšších posuvech (cca od  $1\text{ mm}\cdot\text{ot}^{-1}$ ) od daného směru. Kromě toho křivky neprocházejí počátkem souřadnic, ale protínají se se svislou osou v určité výšce – na určitých hodnotách  $F_c$  – v závislosti na hloubce řezu  $a_p$ .



Obr. 14 Vliv mechanických vlastností materiálu na velikost řezné síly [1]

Průběh křivek v grafu  $F_c = f(f, a_p)$  je silně idealizován, neboť při velmi malých posuvech, případně hloubkách záběru nastává, v závislosti na materiálu obrobku přibližně při poklesu pod  $a=0,05$  mm, vzestup řezné síly jako důsledek vzrůstajícího vlivu zaoblení ostří (viz kapitola 2.2.5.1). Rovnice pro výpočet řezné síly neberou tento vliv v úvahu, proto je vhodné je používat pouze ve výše zmíněném pásmu linearity.



Obr. 15 Vliv posuvu, hloubky záběru, řezu a šířky řezu na velikost řezné síly [1]

#### Vliv hloubky řezu

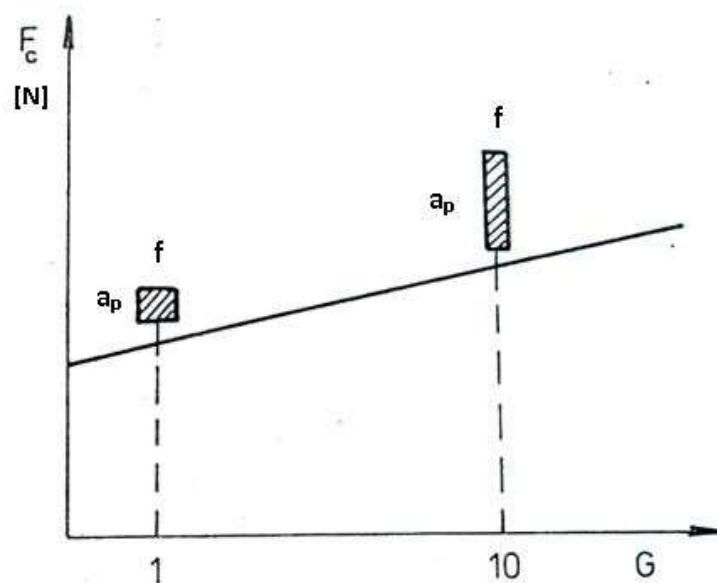
Průběh závislosti  $F_c = f(a_p)$ , je lineární v závislosti na hloubce odřezávané vrstvy, tzn. že velikost řezné síly  $F_c$  stoupá rovnoměrně, což představuje přímku, viz obr. 15. Podle zvolené hloubky řezu stoupají přímky strměji nebo pozvolněji, je-li velikost posuvu vyšší nebo nižší.

#### Vliv štíhlostního poměru řezu

Pod pojmem štíhlostní poměr řezu se uvádí podíl hloubky řezu a posuvu, dle vztahu 20. Jeho vliv lze slovně vyjádřit tak, že nízká hodnota  $G$  je vhodnější z hlediska řezných sil a celkově nejnižších hodnot  $F_c$  je dosahováno při čtvercovém průřezu, tzn. Pro  $G=1$ . Naopak velký poměr  $G$  přináší zvýšení trvanlivosti nástroje.

Přehledně znázorňuje působení poměru  $G$  na velikost síly  $F_c$  obr. 16.

$$G = \frac{a_p}{f} \quad (19).$$

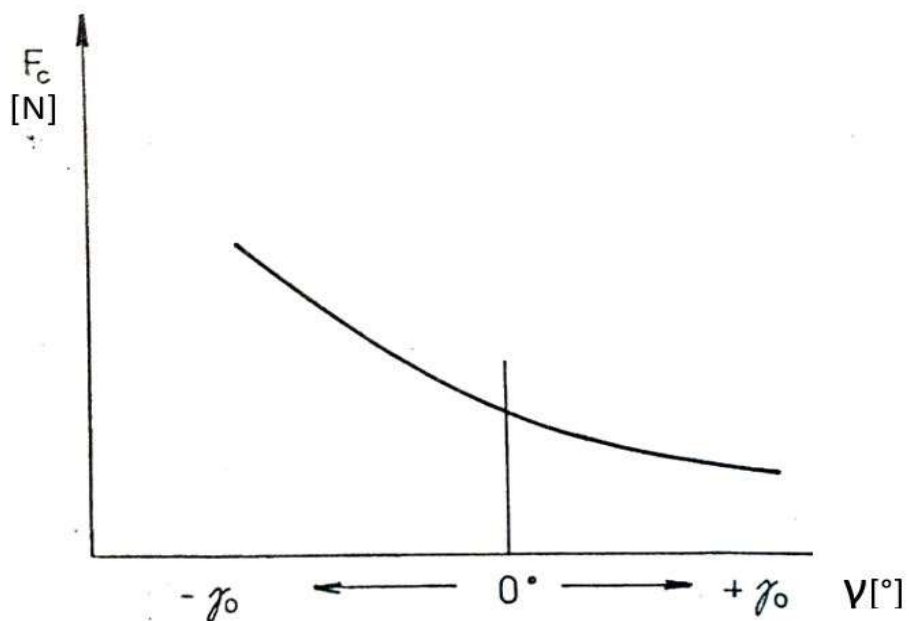


**Obr. 16 Vliv štíhlostního poměru na velikost řezné síly [1]**

Vliv geometrie břitu

*Vliv úhlu čela*

Vliv úhlu čela  $\gamma_0$  je znázorněn v grafu na obr. 17. Z něj lze vyčíst, že řezná síla  $F_c$  roste, klesá-li úhel čela až do záporných hodnot. Naopak roste-li v kladných hodnotách, řezná síla klesá.



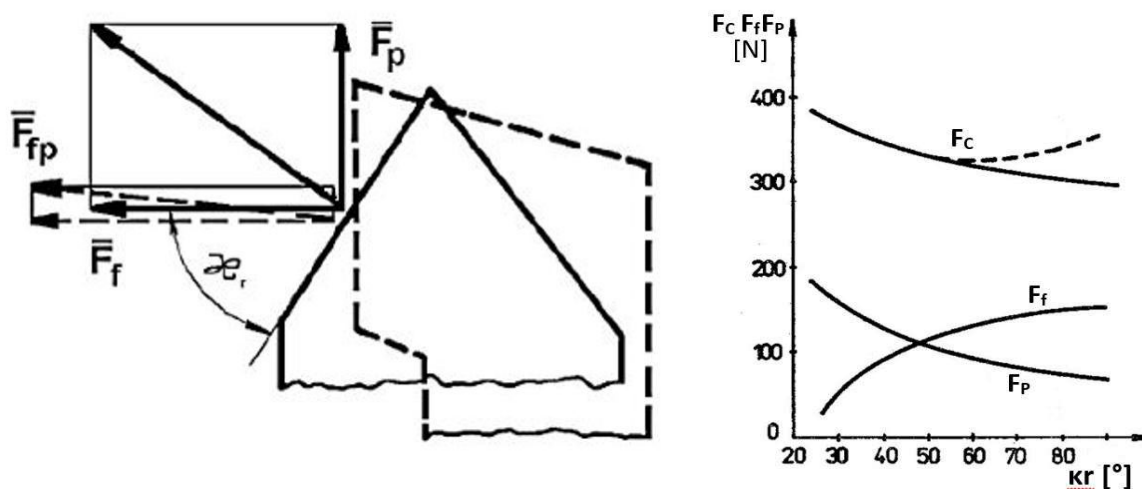
**Obr. 17 vliv úhlu čela na velikost řezné síly [1]**

### Vliv úhlu nastavení

Úhel nastavení ovlivňuje řeznou sílu  $F_c$  pouze minimálně. Pro případy vázaného obrábění, velmi častého v praxi, je minimum  $F_c$  při  $\kappa_r=60^\circ$ , viz obr. 15. Pro volné řezání však už řezná síla se vzrůstajícím úhlem nastavení nad  $60^\circ$  zůstává konstantní, případně mírně klesá. Pro vázané obrábění naopak nastává vzrůst řezné síly  $F_c$ .

### Vliv řezné rychlosti

**Řezná rychlost** ovlivňuje v podstatě stejně všechny tři složky řezné síly. Její vliv na velikost řezné složky  $F_c$  je znázorněn na obr. 19.

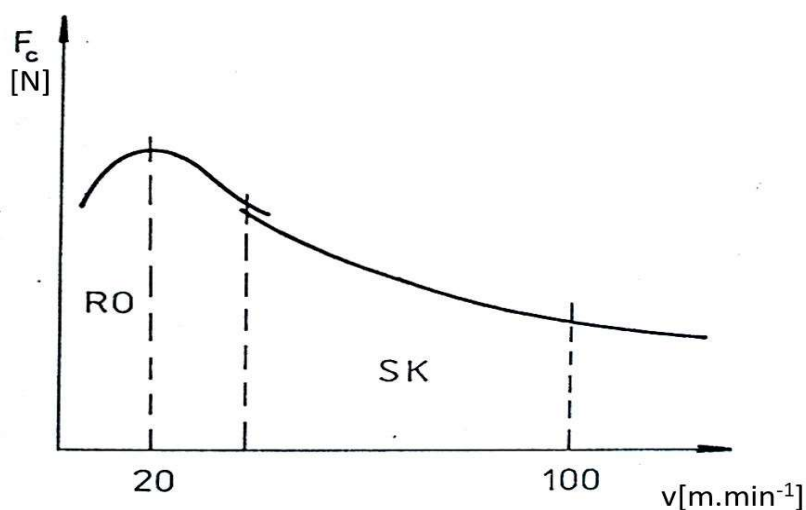


Obr. 18 Vliv úhlu nastavení  $\kappa_r$  na řezné síly [1] [4]

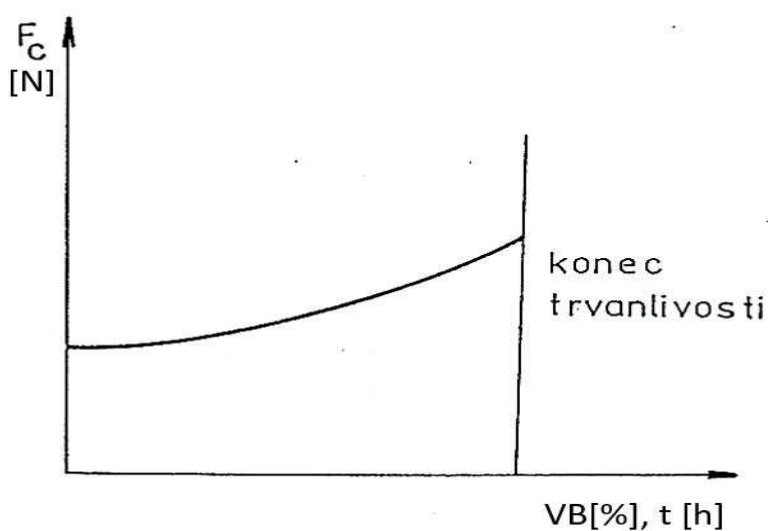
Z praktického hlediska má význam síla v rozmezí řezných rychlostí  $v_c=100-600\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$ , kdy se tvoří plynulá tříska a řezná síla s rostoucí řeznou rychlostí klesá relativně pomalu. Naopak při nízkých řezných rychlostech okolo  $20\text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ , řezná síla rychle vzrůstá. Vzrůst řezné síly ve vymezeném intervalu je přibližně 20 % a platí např. pro ocel, ocel na odlitky a šedou litinu při středních hodnotách posuvu.

### Vliv opotřebení břitu řezného nástroje

Během obrábění dochází k opotřebení řezného nástroje v místech jeho styku s třískou a obráběnou plochou a vzniká tak na čele výmol a na hřbetě opotřebovaná ploška. Jejich rozměry se s postupujícím časem, po který je nástroj v záběru, zvětšují. Nárůst opotřebení se zpravidla projevuje zvětšením řezné síly (obr. 20) [1]. Zvláště významný vliv má opotřebení břitu, díky kterému může řezná síla  $F_c$  vzrůst až o 30-50%. S růstem opotřebení rostou úměrně i složky řezné síly. Toto může být v konečném důsledku příčinou vylomení řezné části nástroje.



Obr. 19 Vliv řezné rychlosti na velikost řezné síly [1]



Obr. 20 Vliv míry opotřebení na velikost řezné síly [1]

#### Vliv chladicích a mazacích prostředků [1]

Použití chladicích a mazacích kapalin snižuje velikost řezné síly ve srovnání s obráběním za sucha. Složení a vlastnosti těchto kapalin hraje při tomto poklesu významnou roli a za určitých okolností lze dosáhnout poklesu řezné síly až o 10-15% oproti obrábění za sucha. Tento pokles má význam především u nástrojů z rychlořezné oceli.

V případě SK a řezné keramiky, které jsou citlivé na výkyvy teplot, se doporučuje obrábět bez procesních kapalin – tzv. na sucho.

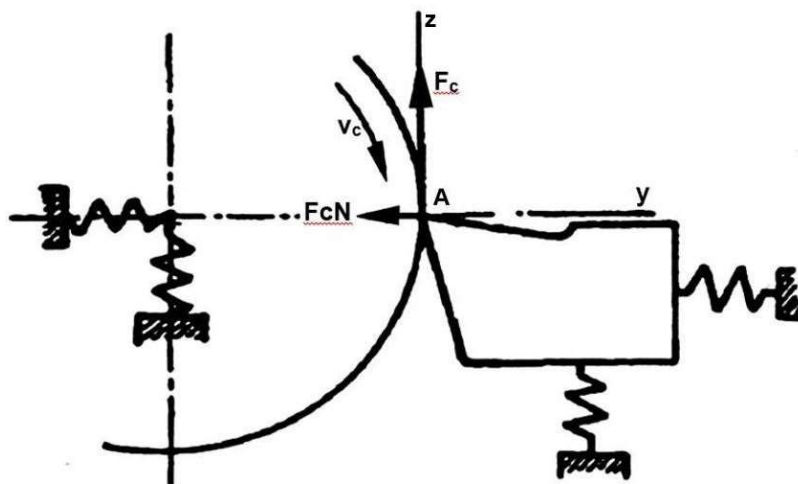


## Kmitání obráběcího systému [1] [2] [4]

### Kmitání

Obráběcí stroj, nástroj a obrobek tvoří obráběcí systém se složitými dynamickými charakteristikami. Kmitání jednotlivých prvků obráběcího systému je průvodním jevem řezného procesu.

Pro názornost je na obr. 21 naznačen zjednodušený dynamický model obráběcího systému, charakterizující stav při běžném ortogonálním řezání.



Obr. 21 Zjednodušený dynamický model obráběcího systému - soustružení, ortogonální řezání [2]

Hmotný bod A v místě styku obrobku a nástroje v důsledku proměnlivosti sil  $F_c$  a  $F_{cN}$  kmitá ve směru osy z a ve směru osy y s určitými frekvencemi a amplitudami.

Kmitání jednotlivých prvků obráběcího systému může mít za následek zhoršení jakosti obrobené plochy (obr. 22), zvýšené opotřebení nástroje, vylamování částic břitu nástroje (chipping), celkovou destrukci břitu nástroje, zvýšení hlučnosti obráběcího procesu, poruchu obráběcího stroje apod.

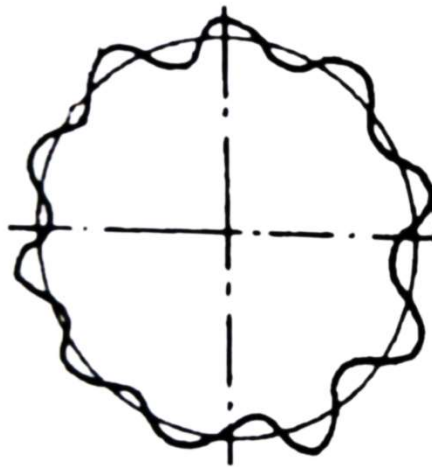
Podle zdroje budících sil se rozliší vynucené a samobuzené kmitání.

### Vynucené kmitání

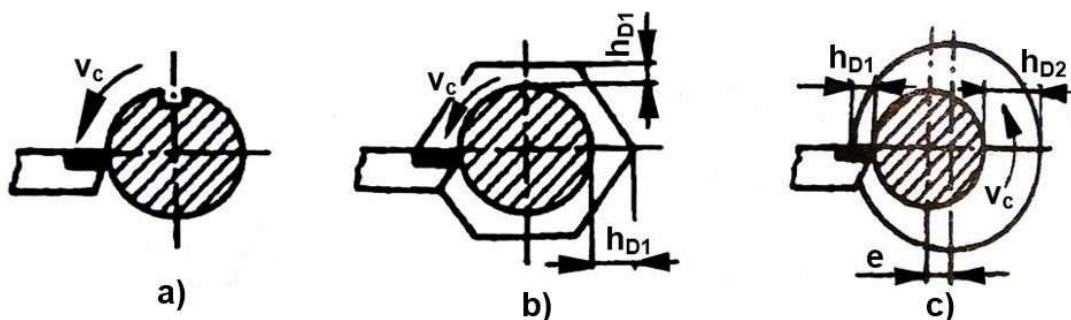
Vynucené kmitání je vyvoláno periodicky proměnlivými silami, působícími na jednotlivé prvky obráběcího systému:

- **Silové impulzy vznikající v obráběcím systému**
  - nevyváženost rotujících částí (obrobek, nástroj, rotující části obráběcího stroje)
  - přímočaré vratné pohyby částí (obrobek, nástroj, části obráběcího stroji)

- **Periodicky přerušovaný řezný proces**
  - Periodická změna průřezu třísky (obr. 20)
  - přerušované, cyklické řezné procesy (hoblování, obrážení).
- **Silové impulzy vnesené do obráběcího systému přes základy obráběcího stroje**
  - technologické systémy a zařízení instalované v blízkém okolí obráběcího stroje (ventilátory, kovací stroje).



Obr. 22 Úchylky kruhovitosti válcové plochy v důsledku vynuceného kmitání [2]

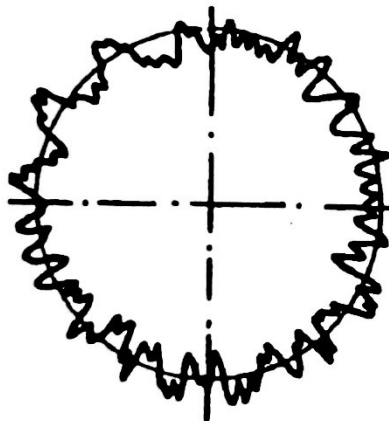


Obr. 23 Periodická změna jmenovité tloušťky průřezu třísky při soustružení - příklady a - přerušovaný řez, b - soustružení šestihranného polotovaru, c - soustružení výstředně ustaveného polotovaru [ 2 ]

#### *Samobuzené kmitání*

Samobuzené kmitání bezprostředně souvisí s řezným procesem a jeho nestabilitou. Příčinou může být opakované uvolňování nárůstku, opakovaná tvorba elementu třísky, tvrdší složka ve struktuře materiálu obrobku, nepravidelný přídavek na obráběných plochách, periodické opotřebení pracovní plochy brousicího kotouče apod. Samobuzené

kmitání se projevuje charakteristickým zvukem při obrábění (vysoké frekvence), charakteristickými stopami na povrchu obrobku („pochvěný povrch“), úchylkami tvaru obrobku („vlnitost“) - obr. 24.



**Obr. 24 Úchylka kruhovitosti válcové plochy jako důsledek samobuzeného kmitání. [4]**

#### 2.2.5.6. MĚRNÁ ŘEZNÁ SÍLA, MĚRNÝ ŘEZNÝ ODPOR [1] [4]

Řezný nástroj při odřezávání vrstvy materiálu z obrobku při daném průřezu ( $f \times a_p$ ) překonává odpor, jehož velikost určují především fyzikálně-mechanické vlastnosti daného materiálu. Pro překonání uvedeného odporu je nutné vynaložit určitou sílu  $F_c$ . Měrná řezná síla (odpor) je velikost tangenciální složky řezné síly vztažená na  $1 \text{ mm}^2$  plochy odřezávané vrstvy  $A_D$ :

$$k_C = \frac{F_c}{A_D} = \frac{R_c}{A_D} \quad [\text{MPa}] \quad (20).$$

Průřez  $A_D$  je pro dané řezné podmínky veličina, kterou dokážeme vypočítat z geometrických nebo kinematických parametrů daného způsobu obrábění.

Pro volné ortogonální obrábění platí:

$$A_D = f \cdot a_p = a \cdot b \quad [\text{mm}^2] \quad (21),$$

potom tedy platí:

$$k_C = \frac{F_c}{f \cdot a_p} = \frac{F_c}{a \cdot b} \quad [\text{MPa}] \quad (22).$$

Ze znalosti měrné řezné síly pro daný případ obrábění lze určit teoretickou velikost řezné síly (odporu). Měrná řezná síla závisí na obráběném materiálu, hloubce řezu, řezné rychlosti, na parametrech nástroje (nástrojových úhlech, poloměru špičky...), řezném prostředí, velikosti opotřebení bříty. [4]

Obráběný materiál ovlivňuje velikost měrné řezné síly, zejména svou pevností, tvrdostí, houževnatostí a zpevňovací schopností.

Při stejných řezných podmínkách platí pro vzájemný vztah velikostí  $k_C$  dvou druhů ocelí nebo slitin lehkých kovů přibližný vztah daný poměrem pevností v tahu  $R_m$ , resp. HB obou porovnávacích materiálů.

$$\frac{k_{C1}}{k_{C2}} = \left(\frac{R_{m1}}{R_{m2}}\right)^n \quad n = 0,3 \div 0,7 \quad (23).$$

Pro vzájemný vztah dvou litin, resp. křehkých materiálů platí analogicky.

$$\frac{k_{C1}}{k_{C2}} = \left(\frac{HB_1}{HB_2}\right)^r \quad r = 0,3 \div 0,7 \quad (24).$$

Měrný řezný odpor (sílu) lze přibližně určit pro uvažovanou technologii ze vztahu

$$k_C = K_p \cdot R_m \quad [MPa] \quad (25).$$

Konstanta  $K_p$  přísluší dané technologii a určitým pracovním podmínkám.

Na měrnou řeznou sílu  $k_C$  působí právě tolik vlivů, jako na řeznou sílu  $F_C$ . Je však třeba si povšimnout toho, že vliv dvou řezných podmínek – posuvu  $f$  a hloubky řezu  $a_p$ , se projevuje zásadně odlišně na měrnou řeznou sílu  $k_C$  a hlavní složku řezné síly  $F_C$ . (rovnice 20-22). [1]

Tato funkční závislost se zpravidla konkretizuje vztahem:

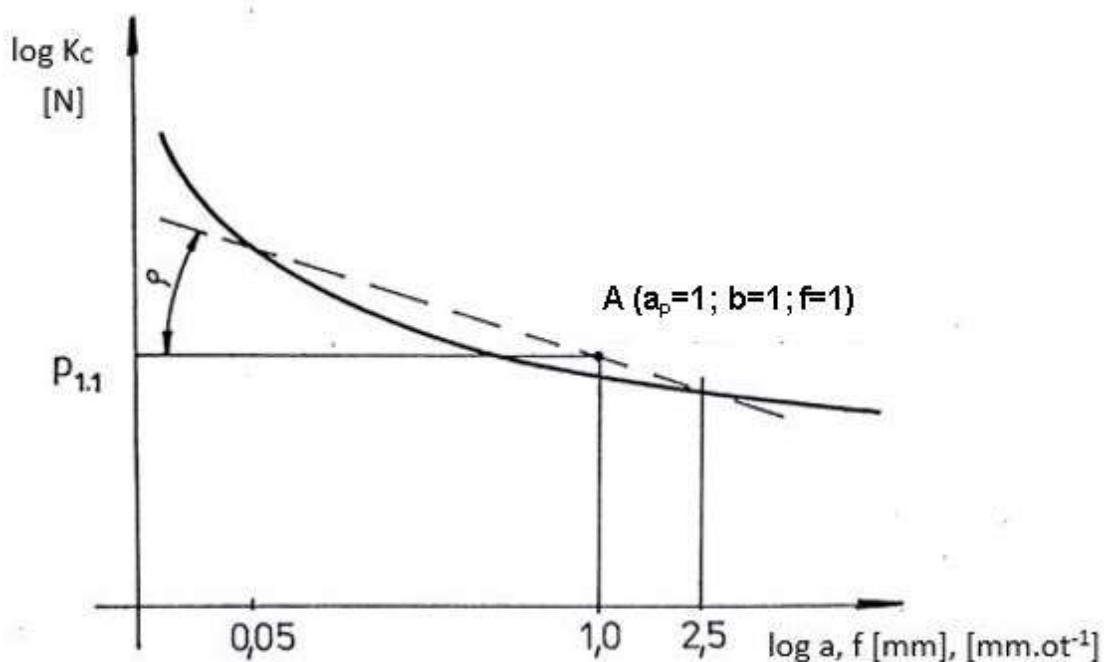
$$k_C = \frac{c_p}{a^n} = \frac{k_p}{f^n} \quad [MPa] \quad (26)$$

a je znázorněna v grafu na obrázku 25. [1] [4]

Zvlášť zajímavý a významný je vliv posuvu  $f$ , resp. hloubky záběru  $a$ . I ve dvojlogaritmických souřadnicích má hyperbolický průběh závislost  $k_C = F(f)$ ,

resp.  $k_C = f(a)$ . S určitým přiblížením v intervalu používaných posuvů  $\langle 0,05; 2,5 \rangle$  jej lze nahradit přímkou, jak znázorňuje graf na obr. 25.

Ze vztahu (26) i z grafu na obr. 25 vyplývá, že se zvětšováním hloubky záběru  $a$ , případně posuvu  $f$ , klesá měrná řezná síla. Strmost poklesu je závislá především na fyzikálních vlastnostech obráběného materiálu. Z toho vyplývá, že měrná řezná síla  $k_C$  není prakticky ovlivňována změnou hloubky řezu  $a_p$ , tzn.  $k_C \neq f(a_p)$ ,  $k_C \approx \text{konst.}$  Toto platí především pro řezné podmínky spojené s tvorbou plynulé třísky. Avšak ani v oblasti vzniku článkovité třísky nebyl zaznamenán vliv hloubky řezu na měrnou řeznou sílu. Ostatní vlivy se projevují obdobně jako u řezné síly  $F_c$  (viz kap 2.2.5.5.) [1]



Obr. 25 Vliv posuvu a hloubky řezu na velikost měrné řezné síly [1]

## 2.2.6. STANOVENÍ ŘEZNÝCH SIL PŘI OBRÁBĚNÍ [1]

Způsoby stanovení řezných sil jsou znázorněny v grafu na obr. 26. Jsou rozděleny podle vstupních údajů, s jejichž pomocí dokážeme určit velikost výsledné řezné síly. Znalost hodnot řezných sil nám umožňuje určit např. velikost krouticích momentů  $M_k$ , a potřebného výkonu pro obrábění  $P_{ef}$ . Tyto údaje lze následně využít pro pevnostní a výkonostní výpočty částí obráběcího systému. Stanovení řezných sil lze v zásadě provést dvojím způsobem, měřením nebo výpočtem.

### 2.2.6.1. STANOVENÍ ŘEZNÝCH SIL VÝPOČTEM [1]

Výpočtové metody lze rozdělit podle způsobu výpočtu do tří skupin:

- Stanovení řezné síly na základě teoretických výpočtů
- Výpočet řezné síly pomocí měrné řezné síly
- Výpočet metodou experimentálních rovnic.

Podrobnosti o jednotlivých metodách výpočtu lze nalézt v příslušné literatuře, např. v [1]. Tato bakalářská práce zmiňuje pouze vztah mezi řeznou a měrnou řeznou silou, s ohledem na informace obsažené v kapitole 2.2.5.5.

Výpočet řezné síly z měrné řezné síly

Úpravou rovnic (21 a 22) [1] získáme velmi základní vztah pro výpočet řezné síly  $F_C$  :

$$F_C = k_C \cdot A_D \quad [N] \quad (27).$$

Je tvořen součinem měrné řezné síly a průřezu odřezávané vrstvy. Tyto průřezy a způsob jejich výpočtu se liší podle způsobu obrábění.

Po úpravě rovnice (37) bude:

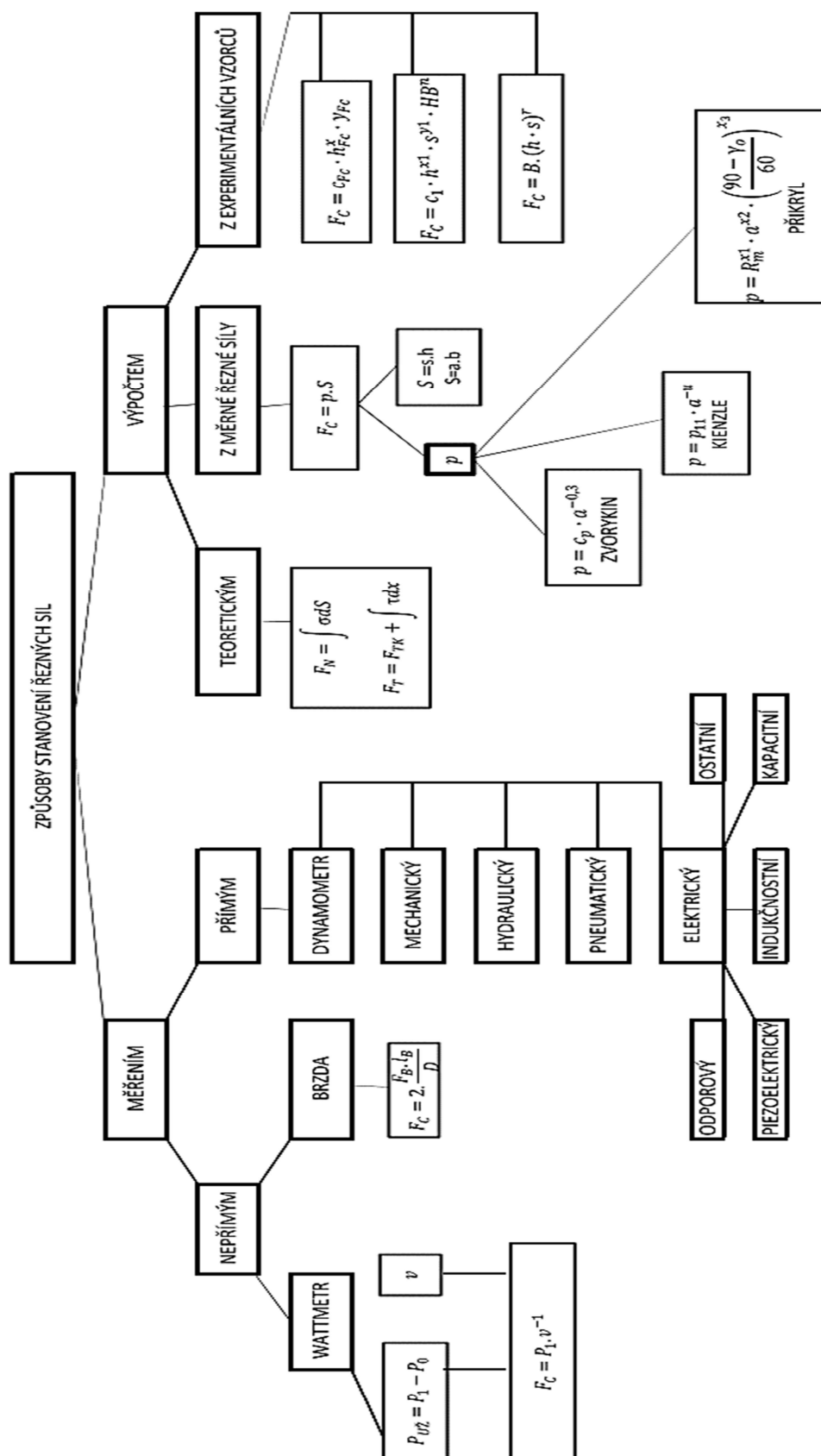
$$F_C = k_C \cdot a \cdot b = k_C \cdot f \cdot a_P \quad [N] \quad (28).$$

Měrný řezný odpor (síla)  $k_C$  byl již charakterizován v (kap 2.2.5.6). [1]

Pro numerické výpočty je však třeba znát jeho hodnotu pro daný způsob obrábění. Lze ho získat:

- Měřením, které zahrnuje jednak přesné měření hlavní složky řezné síly a plochy styku třísky s čelem nástroje
- Výpočtem, který zahrnuje vliv hlavních činitelů, působících na měrnou řeznou sílu.
- Pomocí tabulek, které obsahují orientační údaje o velikosti měrné řezné síly.

Na základě těchto výpočtů lze správně určit pouze řeznou sílu, která odpovídá podmínkám experimentu, při kterém byla hodnota měrné řezné síly  $k_C$  stanovena. Pro jiné případy je nutné použít opravné koeficienty, dohledatelné v literatuře, např. [1]



Obr. 26 Způsoby stanovení řezných sil při obrábění [1]

### 2.2.6.2. STANOVENÍ ŘEZNÝCH SIL MĚŘENÍM

Chceme-li stanovit složky řezné síly s vyšší přesností nebo postihnout i dynamiku obrábění, musíme přistoupit k měření řezných sil [1].

Řeznou sílu resp. Její složky můžeme měřit dvěma způsoby:

1. Nepřímým měřením sil, při kterém měříme příkon nebo krouticí moment na vřetení a z něho řeznou sílu vypočteme.
2. Přímým měřením sil pomocí dynamometru.

#### Nepřímé měření řezných sil

##### *Nepřímé měření sil z příkonu stroje*

Efektivní (užitečný) příkon stroje  $P_{už}$  spotřebovaný při obrábění na vnikání nástroje do obrobku a oddělování třísky je dán :

$$P_{už} = F \cdot v_c \cdot \cos\omega \quad [W] \quad (29)$$

$F$  – výsledná řezná síla

$v_c$  – relativní rychlost nástroje vůči obrobku

$\omega$  - úhel mezi vektorem rychlosti a síly

Protože velikosti  $F$  a  $\omega$  je složité určit, je výhodné rozložit tento výkon obecně na výkon vytvářený podle rovnice (15) [1]

Rychlosti  $v_f$  a  $v_p$  jsou asi  $10^3$  krát menší než řezná rychlost  $v_c$ . V uvedené rovnici proto můžeme zanedbat členy  $F_f \cdot v_f$  a  $F_p \cdot v_p$ , dopustíme se tak při stanovování užitečného výkonu chyby v řádu pouze  $10^{-3}$  až  $10^{-2} P_{už}$ , což je z hlediska požadované přesnosti metody zanedbatelné. Hlavní složku řezné síly tedy vypočteme ze vztahu :

$$F_c = \frac{P_{už}}{v_c} \quad [N] \quad (30)$$

Užitečný výkon je rozdílem příkonu obráběcího stroje při obrábění  $P_e$  a naprázdno  $P_0$ :

$$P_{už} = P_e - P_0 \quad [W] \quad (31)$$

Zanedbáváme přitom zvýšení pasivních odporů stroje působením řezné síly.

Příkon stroje, poháněného třífázovým elektromotorem měříme třemi wattmetry nebo speciální soupravou pro měření příkonu ve třífázové síti.



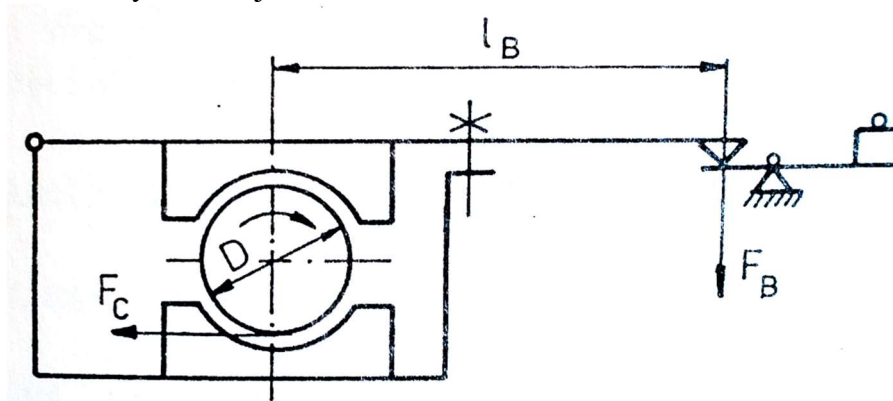
### *Nepřímé měření řezných sil z momentu na vřetení*

Tato metoda spočívá v porovnání krouticího momentu při obrábění a při brždění vřetene za stejného příkonu stroje.

Nejdříve změříme příkon stroje  $P_e$  při obrábění. Poté zatížíme vřeteno stroje brzdou a stanovíme krouticí moment při stejném příkonu stroje jako při obrábění (obr 27) [1]. Při stejných otáčkách vřetene platí rovnost momentů a odtud:

$$F_c = \frac{2 \cdot F_B \cdot l_B}{D} \quad [N] \quad (32).$$

Stejně jako v předchozím případě zanedbáváme výkon potřebný pro posuv nástroje. Pasivní odpory jsou při řezání i měření momentu zhruba stejné a měření je proto přesnější, je však technicky náročnější.



**Obr. 27 Nepřímé měření řezných sil z momentu na vřetení [1]**

### *Přímé měření řezných sil [1]*

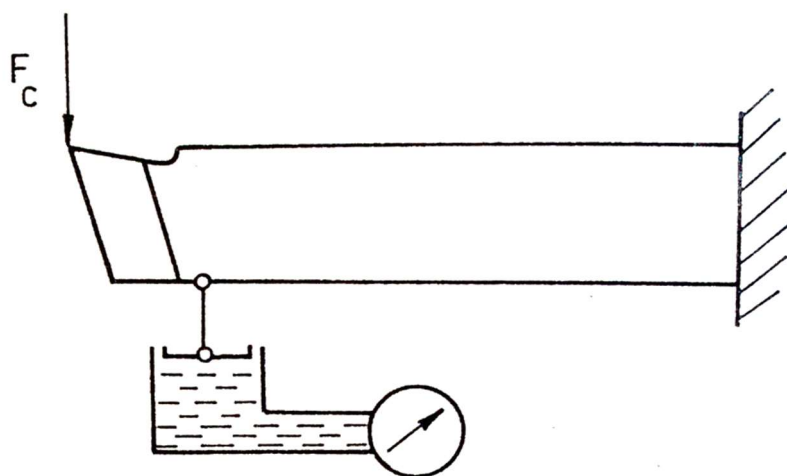
Pro přímé měření sil se používají dynamometry, umožňující měřit jednu, dvě nebo tři složky řezné síly, případně krouticí moment. Základní součástí dynamometru je pružný element, který se deformuje působením měřené síly. Velikost deformace tohoto elementu měříme snímačem a převádíme na jinou veličinu, kterou jsme schopni měřit nebo registrovat. Zpracování signálu ze snímače se provádí v měřící aparatuře.

### *Rozdělení dynamometrů*

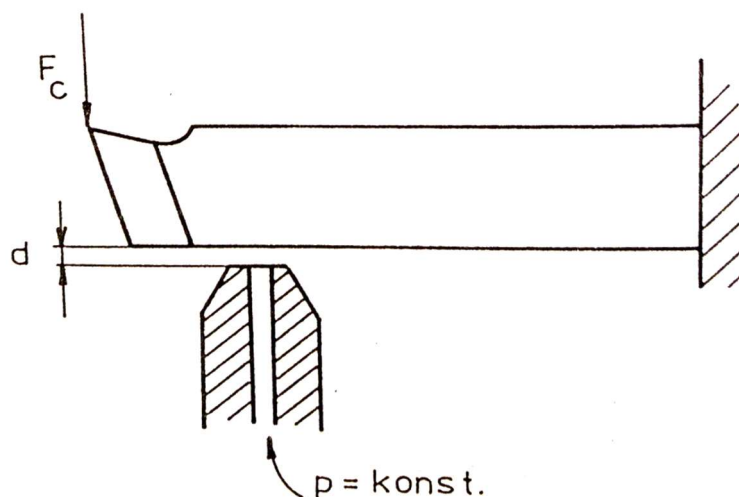
Podle toho na jakou veličinu převádí snímač měřenou sílu lze dynamometry rozdělit na :

- mechanické
- Hydraulické
- Pneumatické
- elektrické

**Pneumatickým dynamometrem** měříme průhyb deformačního členu dynamometru na základě množství vzduchu protékajícího tryskou. Zmenší-li se průhybem nože mezera d, zmenší se úměrně i průtok vzduchu. (obr. 29).



**Obr. 28 – Schéma hydraulického dynamometru [1]**



**Obr. 29 – Schéma pneumatického dynamometru [1]**

Nejčastějšími dynamometry pro měření řezných sil jsou dynamometry elektrické. Síla se podle různých fyzikálních principů mění na elektrickou veličinu, jejíž měření

je poměrně snadné a dobře zpracovatelné i výpočetní technikou. Podle druhu použitého snímače se dělí na snímače:

1. Odporové
2. Piezoelektrické
3. Indukční
4. Kapacitní
5. Ostatní (magnetoelektrické, magnetostrikční apod. ...)

Výhodou elektrických dynamometrů je zejména vysoká citlivost, přesnost, snadná registrace síly a schopnost dynamického měření sil. Z uvedených typů se v obrábění používají pro konstrukci dynamometrů nejčastěji tenzometrické a piezoelektrické snímače.

## **2.3. MĚŘENÍ ŘEZNÉ SÍLY A UŽITEČNÉHO VÝKONU**

Jak bylo konstatováno v kap. 2.2.4., řezná síla  $F_c$  je společně s řeznou rychlostí  $v_c$  veličinou, která přímo ovlivňuje velikost užitečného výkonu  $P_{už}$ . Narozdíl od řezné rychlosti, která je jednou z hlavních řezných podmínek, je řezná síla volbou řezných podmínek přímo ovlivňována. Její měření probíhá obdobně jako v měření užitečného výkonu. V zásadě platí, že přímé metody měření řezných sil jsou použitelné coby nepřímé pro měření užitečného výkonu a přímé metody měření užitečného výkonu nám dávají hodnoty potřebné pro nepřímé měření řezných sil.

### 3. NÁVRH METODIKY MĚŘENÍ

Pro splnění cílů této bakalářské je třeba předem zvolit hlavní nezávislé parametry, včetně jejich rozsahů, pro měření průběhu hodnot užitečného výkonu  $P_{už}$ . Dále je nutné předem navrhnout vhodné strojní vybavení včetně řezného nástroje. Měřicí přístroje použité k experimentům jsou definovány zadáním této práce. Je ovšem třeba navrhnout způsob jejich použití, odečtu a zpracování hodnot jimi naměřených.

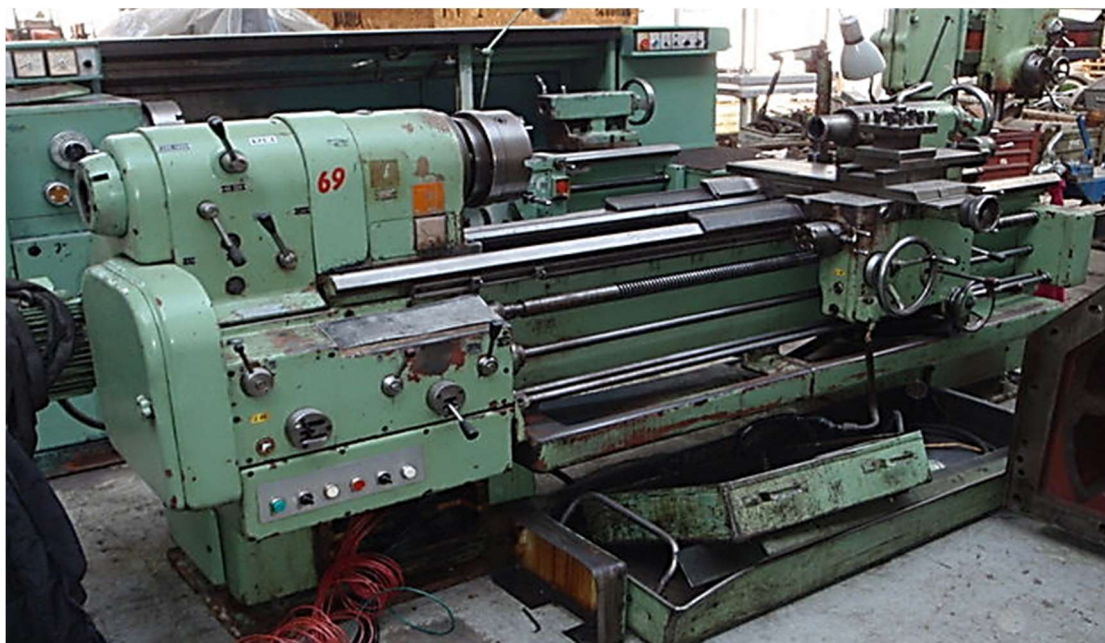
#### 3.1. VOLBA NEZÁVISLÝCH PARAMETRŮ MĚŘENÍ

Měření bude provedeno v závislost na 3 parametrech popsanych v kapitole 2.2.5.5. které mají zásadní vliv na velikost užitečného výkonu, respektive řezných sil. Jako nezávislé parametry měření budou měřeny:

1. otáčky stroje  $n$  [ $\text{min}^{-1}$ ] – parametr přímo ovlivňuje velikost řezné rychlosti. Pro vyhodnocení experimentu budeme dále pracovat pouze s hodnotou řezné rychlosti  $v_c$  [ $\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$ ],
2. posuv  $f$  [ $\text{mm} \cdot \text{ot}^{-1}$ ] – ovlivňuje velikost řezné síly,
3. hloubka řezu (záběru)  $a_p$  [ $\text{mm}$ ] – ovlivňuje velikost řezné síly.

#### 3.2. PARAMETRY OBRÁBĚCÍHO STROJE- SOUSTRUHU

Pro všechny provedené operace při obrábění bude použit soustruh **SU 50 / 1500** (obr. 30) od výrobce **TOS LIPNÍK**. Parametry soustruhu jsou uvedeny v tabulce 2.



Obr. 30 – Univerzální soustruh SU 50/1500, ilustrační foto [9]

UNIVERZÁLNÍ SOUSTRUH SU 50 / 1500 - TOS LIPNÍK		
oběžný průměr nad ložem	500	mm
vzdálenost hrotů	1500	mm
oběžný průměr nad suportem	250	mm
vrtání vřetena	56	mm
kužel ve vřetenu M 60	1:20	xxx
kužel hrotu	MORSE 5	xxx
šířka lože	420	mm
průměr lícní desky	500	mm
průměr sklíčidla	240	mm
max. váha obrobku	1100	kg
otáčky vřetena:		
počet stupňů	22	xxx
rozsah otáček	11.2-1400	ot/min
posuvy:		
počet	48	xxx
podélné v rozsahu	0.027-3.8	mm/ot
příčné v rozsahu	0.013-1.9	mm/ot
závity:		
36 metrických, stoupání 0.5-36mm		
46 Whitworthových záv. 1" 7/8-72		
28 modulových modul 0.5-18		
Diametral Pitch 15/8-72		
rychlý posuv suportu:		
podélný	3	m/min
příčný	1,5	m/min
elektromotory na pohon stroje:		
počet	2	xxx
otáčky	1400	ot/min
výkon	2x5,5	kW
Vnější rozměry a hmotnost:		
půdorysná plocha pro hroty	1000	mm
(š x d)	1180x3775	mm
váha stroje s normálním příslušenstvím pro hroty 1000mm	2800	kg

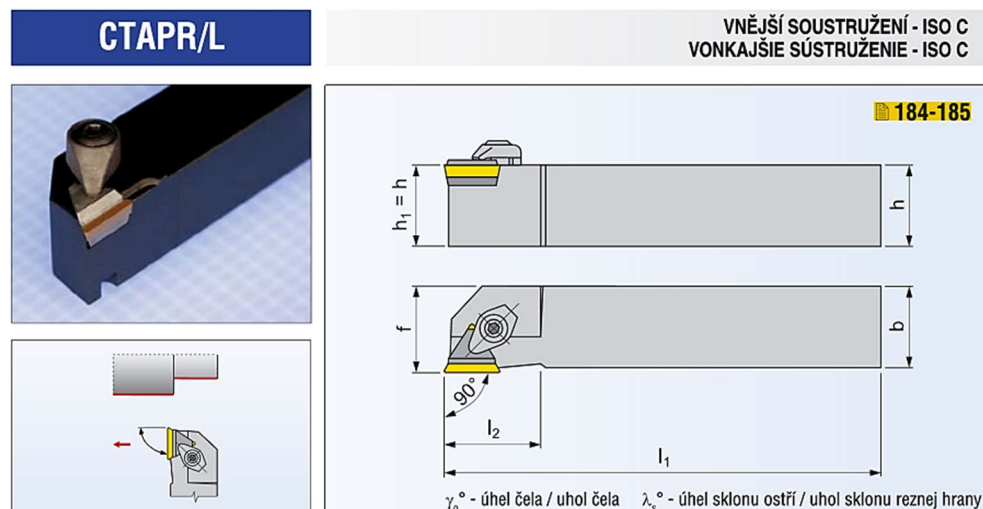
Tab. 1 - Parametry soustruhu SU 50 / 1500 - TOS LIPNÍK [8]

### 3.1. PARAMETRY NÁSTROJE – SOUSTRUŽNICKÉHO NOŽE

Pro obrábění bude použit soustružnický nůž pro výměnné břitové destičky výrobce Pramet s označením CTAPR 2020 K 16.

Parametry soustružnického nože jsou uvedeny v tabulce 2 včetně vyobrazení a jeho hlavních rozměrů.

Parametry použité břitové destičky (BD) jsou včetně rozměrů v tabulce 3.



NŮŽ PRO VNĚJŠÍ SOUSTRUŽENÍ / NŮŽ PRE VONKAJŠIE SÚSTRUŽENIE

ISO	R/L	Rozměry / Rozmery [mm]										kg	ND	VBD VRD
		$h=h_1$	$b$	$f$	$l_1$	$l_{2max}$				$\lambda_s^\circ$	$\gamma_0^\circ$			
CTAPR/L 2020 K 16	●/○	20	20	20,5	125	32				0	+5	0,40	CTP2	TP.. 1603..

Tab. 2 – Výňatek z katalogu Pramet [8] pro konkrétní soustružnický nůž

VYMĚNITELNÉ BŘITOVÉ DESTIČKY  
VYMENTELNÉ REZNÉ DOŠTIČKY

TPUN

Velikost Veľkosť	(l)	d	s		
1603	16,5	9,525	3,18		

Utvářejč Utvárač	ISO	ANSI	Materiály / Materiály								Rádus Rádus	Posuv na ot. Posuv na ot.		Hĺbka rezu Hĺbka rezu	
			6640	8016							$r_c$	$f_{min}$	$f_{max}$	$a_{pmin}$	$a_{pmax}$

TPUN 160308

TPUN 322

● ●

0,8

0,10

0,30

0,8

4,8

Tab. 3 – Výťah z katalogu Pramet [8] pro konkrétní břitovou destičku



## 3.2. POUŽITÉ MĚŘICÍ PŘÍSTROJE

Náplní experimentů bude porovnání jednotlivých metod měření užitečného výkonu na základě hodnot získaných přímou i nepřímou metodou. K tomu budou použita tři zařízení a to:

- měřicí kufr (obr. 31)
- třífázový analyzátor výkonu DW - 6092 (obr. 32)
- dynamometr Kistler (obr. 33).

V průběhu experimentu bude měření prováděno současně na všech 3 měřicích zařízeních tak, aby byly zaručeny stejné podmínky během měření.

### 3.2.1. MĚŘICÍ KUFR

Pro přímé měření příkonu stroje bude použit měřicí kufr osazený 3-mi ampermetry, wattmetrem a voltmetrem. Pro měření bude použit sdružený wattmetr, v konfiguraci, která je patrná z obr 29.



Obr. 31 – Měřicí kufr

### 3.2.2. TŘÍFÁZOVÝ ANALYZÁTOR VÝKONU DW – 6092

Další přístroj použitý pro přímé měření příkonu stroje bude třífázový analyzátor výkonu DW – 6092, viz obr. 32. Rozsah činného výkonu bude nastaven na: 0,000-9,999 kW, dle parametrů obsažených v tab. 4.



Obr. 32 – 3-fáz. Analyzátor [11]

#### Parametry 3-fáz. Analyzátoru : [11]

- Třífázový wattmetr - analyzátor výkonu (1f/2w; 1f/3w; 3f/3w; 3f/4w)
- True-RMS měření napětí a proudu (UAC: 10V ~ 600V; IAC: 0,2A ~ 1200A)
- Činný výkon (KW MW GW); zdánlivý výkon (KVA MVA GVA); jalový výkon (KVAR MVAR GVAR); energie (WH SH QH PFH); Power faktor (PF); úhel fáze ( $\phi$ ); frekvence
- Programovatelný poměr CT (1 až 600) a PT (1 až 1000)
- Vstupní impedance pro měření UAC je 10MW
- Vyhovuje normě: IEC 1010, CAT III 600V
- Vestavěné hodiny a kalendář, záznam dat na SD kartu v reálném čase
- Nastavitelné vzorkování: 2 až 7200 sekund
- Napájení: 8 x AA 1,5 (alkalické) nebo pomocí 9V adaptéru
- Kompletní set se čtyřmi měřicími šňůrami (TL88-4AT), čtyřmi krokodýlky (TL88-4AC), třemi klešťovými sondami (CP-1200), AC/DC 9V adaptérem, 2GB SD kartou a brašnou v ceně přístroje
- Volitelné příslušenství za příplatek - USB kabel (USB-01), RS232 kabel (UPCB-02), software (SW-U811-WIN)



Parametr	Rozsah	Rozlišení	Přesnost
AC napětí	10 ~ 600V	0,1V	± (0,5% + 0,5V)
AC proud	20A	1mA pro I < 10A; 10mA pro I ≥ 10A	± (0,5% + 0,1A)
	200A	10mA pro I < 100A; 0,1A pro I ≥ 100A	± (0,5% + 0,5A)
	1200A	0,1A pro I < 1000A; 1A pro I ≥ 1000A	± (0,5% + 5A)
Power faktor	0,00 ~ 1,00	0,01	± 0,04
Úhel fáze	-180° ~ 180°	0,1°	± 1° + ACOS(PF)
Frekvence	45 ~ 65Hz	0,1Hz	0,1Hz
Činný výkon	0,000 ~ 9,999kW	0,001/0,01/0,1kW (dle rozsahu I)	± (1% + 0,008kW)
	10,00 ~ 99,99kW	0,01/0,1kW (dle rozsahu I)	± (1% + 0,08kW)
	100,0 ~ 999,9kW	0,1kW	± (1% + 0,8kW)
	1,000 ~ 9,999MW	0,001MW	± (1% + 0,008MW)
Zdánlivý výkon	0,000 ~ 9,999kVA	0,001/0,01/0,1kVA (dle rozsahu I)	± (1% + 0,008kVA)
	10,00 ~ 99,99kVA	0,01/0,1kVA (dle rozsahu I)	± (1% + 0,08kVA)
	100,0 ~ 999,9kVA	0,1kVA	± (1% + 0,8kVA)
	1,000 ~ 9,999MVA	0,001MVA	± (1% + 0,008MVA)

**Další údaje:**

Odběr	300mA <sub>DC</sub> přístroj, 20mA <sub>DC</sub> kleště
Provozní teplota	0 ~ 50°C
Provozní vlhkost	< 80% RH
Datový výstup	USB/RS232 + záznam na SD kartu
Displej	LDC; 81,4 x 61mm (320 x 240px); podsvícení

Max. průměr kleští	86mm
Rozměr přístroje	225 x 125 x 64mm
Rozměr kleští	210 x 64 x 33mm
Hmotnost	přístroj včetně baterií: 1049g kleště: 522g

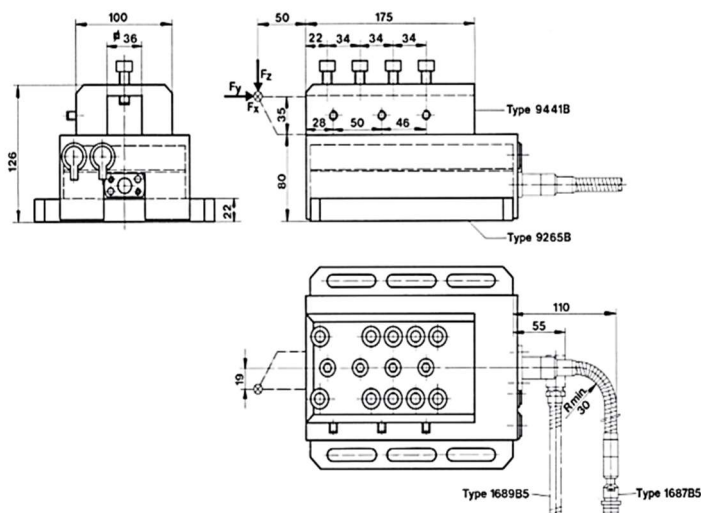
**Tab. 4 – Tabulka nastavitelných rozsahů třífázového analyzátoru výkonu DW – 6092**

### 3.2.3. DYNAMOMETR KISTLER TYPE 9265B

Dynamometr bude použit pro nepřímé měření příkonu v konfiguraci s držákem nástroje Type 9441B, optickým kabelem Type 168785 a nábojovým zesilovačem Type 5019B (obr.34,35), který bude propojen se standardním PC s nainstalovaným softwarem LabVIEW 6.1. , s jehož pomocí budou výsledky měření převedeny do grafické podoby. Při měření pomocí dynamometru Kistler je nutné dynamometr nejprve zkalibrovat pomocí siloměru (obr. 35) a závaží.



**Obr. 33 – Dynamometr Kistler Type 9265B + držák nástroje Type 9441B [10]**



Obr. 34 – Dynamometr Kistler Type 9265B + držák nástroje Type 9441B, schéma s rozměry [10]



Obr. 35 – Siloměr

### 3.3. MĚŘENÉ HODNOTY PRO JEDNOTLIVÉ NEZÁVISLÉ PARAMETRY

#### 3.3.1. NEZÁVISLÝ PARAMETR ŘEZNÁ RYCHLOST $v_c$

Pro měření závislosti  $P_{u\dot{z}} = f(v_c)$ , kdy je nezávislým parametrem řezná rychlost, resp. otáčky stroje budeme odčítat z jednotlivých měřicích přístrojů následující hodnoty.

##### Měřicí kufr

- Počet dílků při chodu naprázdno, jednotlivě pro každou hodnotu nezávislého parametru měření  $v_c$ .
- Počet dílků během záběru pro každou hodnotu  $v_c$ .

##### 3-fázový analyzátor

- Hodnota příkonu stroje při chodu naprázdno pro každou hodnotu  $v_c$ .
- Hodnota příkonu stroje během záběru pro každou hodnotu  $v_c$ .

##### Dynamometr Kistler

- Hodnotu Řezné síly během záběru ve formě grafu uloženého z program Labview pro každou hodnotu  $v_c$ .

### 3.3.2. NEZÁVISLÝ PARAMETR POSUV $f$

Pro měření závislosti  $P_{už} = f(f)$ , kdy je nezávislým parametrem posuv při obrábění, budeme odčítat z jednotlivých měřicích přístrojů následující hodnoty.

#### Měřicí kufr

- Počet dílků při chodu naprázdno, platný pro všechny hodnoty nezávislého parametru měření  $f$ .
- Počet dílků během záběru pro každou hodnotu  $f$ .

#### 3-fázový analyzátor

- Hodnota Příkonu stroje při chodu naprázdno platnou pro každou hodnotu  $f$ .
- Hodnota příkonu stroje během záběru pro každou hodnotu  $f$ .

#### Dynamometr Kistler

- Hodnotu Řezné síly během záběru ve formě grafu uloženého z program Labview pro každou hodnotu  $f$ .

### 3.3.3. NEZÁVISLÝ PARAMETR HLOUBKA ŘEZU $a_p$

Pro měření závislosti  $P_{už} = f(a_p)$ , kdy je nezávislým parametrem hloubka řezu při obrábění, budeme odčítat z jednotlivých měřicích přístrojů následující hodnoty.

#### Měřicí kufr

- Počet dílků při chodu naprázdno, platný pro všechny hodnoty nezávislého parametru měření  $a_p$ .
- Počet dílků během záběru pro každou hodnotu  $a_p$ .

#### 3-fázový analyzátor

- Hodnota příkonu stroje při chodu naprázdno platnou pro každou hodnotu  $a_p$ .
- Hodnota příkonu stroje během záběru pro každou hodnotu  $a_p$ .

#### Dynamometr Kistler

- Hodnotu Řezné síly během záběru ve formě grafu uloženého z program Labview pro každou hodnotu  $a_p$ .

## 3.4. POSTUP ODEČTU MĚŘENÝCH HODNOT

Měření bude provedeno vždy pro 10 hodnot vstupního parametru ve zvoleném rozsahu. Pro každou hodnotu vstupního parametru bude měření vždy 5x opakováno a bude realizováno 3-mi odečty, vždy po ustálení měřených hodnot, z nichž určíme jednoduchý

aritmetický průměr. V případě, že by se tyto 3 odečtené hodnoty od sebe výrazně lišily, bude nutné je zopakovat. Pro každé měření je třeba dbát na stejné nastavení parametrů měření. Hodnoty budou pro každou sadu měření ručně zaznamenány do tabulky pro záznam hodnot (tab. 8), ze které se hodnoty následně opíší do tabulky uložené na CD, ve které bude dopočítáno vše ostatní, viz kap3.5. V případě elektronického zápisu lze použít druhou z uvedených tabulek přímo.

#### 3.4.1. ODEČET HODNOT - MĚŘICÍ KUFR

Při měření bude použita konstanta měření 200, tzn., že každá odečtená hodnota počtu dílků se musí po odečtení vynásobit 200x, čímž získáme hodnotu příkonu  $P_0[W]$  stroje ve Watech. V případě polohy ručičky mezi dílky pomyslně rozpůlíme dílek a určíme, zda je blíže k nižší nebo vyšší hodnotě. Hodnotu zapíšeme do přiložené tabulky č. 8 nebo přímo do přepočtové tabulky uložené na CD. Celkem se bude jednat o 150 měřených hodnot, pro každý nezávislý parametr, celkem tedy 450 hodnot.

#### 3.4.2. ODEČET HODNOT – 3-FÁZOVÝ ANALYZÁTOR

3-Fázový analyzátor je nutné nastavit na správný rozsah hodnot, v našem případě bude nastaven v rozsahu 0-9,999 kW dle tab. 4. Hodnota příkonu v [kW] se zobrazí přímo na displeji přístroje. Její zaznamenání proběhne shodně jako u měřicího kufru, viz kap. 3.4.1. Celkem bude zpracováno 150, resp. 450 hodnot stejně jako v případě měřicího kufru.

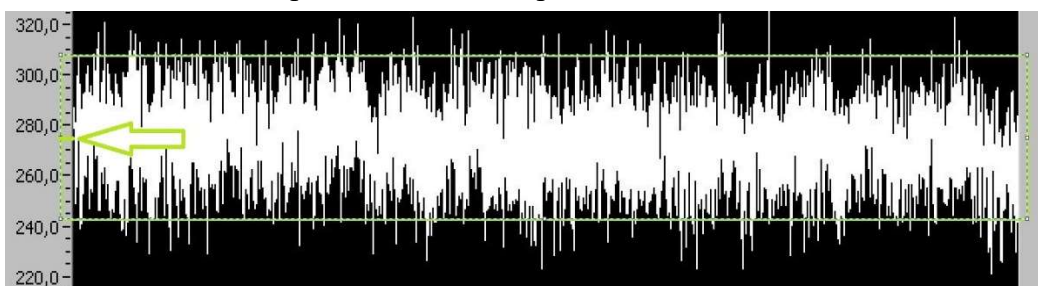
#### 3.4.3. ODEČET HODNOT - DYNAMOMETR KISTLER

Pomocí programu LabVIEW 6.1 proběhne převedení průběhu složek řezné síly  $F$  do grafické podoby. Z tohoto grafu následně odečteme hodnotu hlavní řezné síly  $F_C$ . Vycházíme z předpokladu, že hodnota řezné síly osciluje okolo své střední hodnoty (viz kap. 2.2.5.4, obr. 13) a budeme se tedy snažit určit tuto (střední) hodnotu. Provedeme 3 odečty, dle následujícího návodu. K odečtu hodnot použijeme s výhodou běžně dostupný program Malování, obsažený v M. S. Windows.

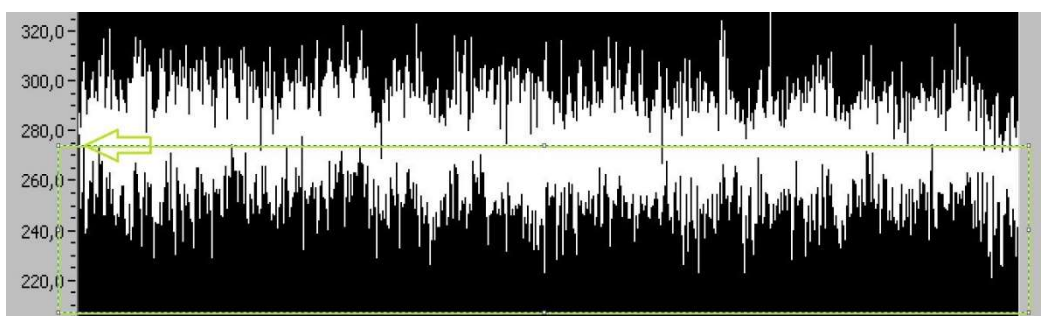
1. Pomocí funkce PrintScreen uložíme 5 grafů s průběhy složek řezné síly pro každou hodnotu nezávislého parametru měření. Celkem se bude jednat o 150 grafů.
2. Z každého grafu určíme 3 střední hodnoty hlavní řezné síly, celkem 450 hodnot. Použijeme 2 postupy odečtu hodnot, dle následujících obrázků 36-38.

Nejprve ohraničíme oblast hustého výskytu hodnot obdélníkem. Extrémní výkyvy hodnot nebudeme uvažovat, tyto mohou ležet mimo ohraničenou oblast. Ve středu svislé hrany hraničního obdélníku odečteme hodnotu řezné síly  $F_c$ , viz obr 37. Následně určíme střední hodnotu pomocí odhadu osy procházející oblastí s nejhustějším výskytem hodnot. Toto provedeme 2x. S výhodou lze použít stávající obdélník a určení osy provést střídavě oběma vodorovnými hranami. V případě, že se námi určené hodnoty budou výrazně lišit je třeba odečet pro daný graf po chvíli opakovat. Schematicky je to naznačeno na obr. 36-38.

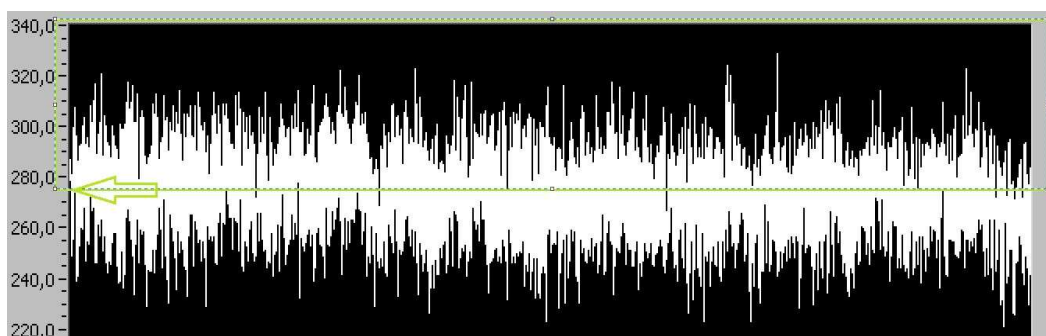
Zaznamenání hodnot proběhne shodně s předchozími metodami.



**Obr. 36 – Odečet střední hodnoty z ohraničené oblasti**



**Obr. 37 – Odečet střední hodnoty odhadem osy hodnot.**



**Obr. 38 – Odečet střední hodnoty odhadem osy hodnot.**

### 3.5. ZPRACOVÁNÍ NAMĚŘENÝCH HODNOT

Naměřené hodnoty budou postupně zapsány do tabulky dle vzoru, viz. tab 8. Podle měřené funkční závislosti se vyplní hlavička tabulky, obsahující všechny důležité parametry, sledované během experimentu. V našem případě použijeme vždy 5 listů (1/5 – 5/5) pro zápis hodnot. Předvyplněné tabulky pro jednotlivá měření jsou součástí příloh na přiloženém CD. Z každých 3 hodnot, odečtených během jednoho odečtu, bude vypočten jednoduchý aritmetický průměr. Jednotlivá měření při stejných vstupních podmínkách budou zpracována dle podmínek Studentova rozdělení s hladinou významnosti 5%. To znamená, že skutečná hodnota  $P_{už}$  se s 95% pravděpodobností bude pohybovat v námi naměřeném a vypočteném rozsahu, viz 3.5.1.

Získané hodnoty budou následně zaneseny do grafů znázorňujících funkční závislosti užitečného výkonu  $P_{už}$  na jednotlivých nezávislých parametrech zvolených v kap. 3.1.

V případě přímého elektronického zápisu lze zapisovat přímo do přepočtové tabulky na přiloženém CD, jejíž ukázkou lze vidět na obr. 39,40. Vyplňujeme vždy zeleně podbarvené části a zbývající hodnoty jsou tabulkou vypočteny. Tabulka pro elektronický zápis hodnot se skládá z jednotlivých listů(záložek), viz obr 39.

--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--

Obr. 39 – Záložky jednotlivých listů elektronické tabulky pro zápis hodnot

#### List „otáčky\_rychlosti“

Tato část tabulky slouží pro počítačové zpracování dat při měření závislosti užitečného výkonu na řezné rychlosti  $P_{už}=f(v_c)$ .

- V této záložce vyplníme do sloupce D řadu zvolených otáček ve zvoleném rozsahu. Hodnoty jsou automaticky přepočítány na hodnotu řezné rychlosti. Tato se následně zobrazí ve sloupci E.
- Do sloupců E a O postupně vyplníme hodnoty odečtené na měřicím kufru(počet dílků n013) a 3-fázovém analyzátoru(PříkonP013) během chodu naprázdno. Hodnoty naprázdno je nutné odečítat pro každou zvolenou hodnotu otáček.
- Do sloupců G, Q, Y následně zapisujeme odečítané hodnoty počtu dílků n13, příkonu P15 a zapisujeme hodnoty řezné síly F15 dle kap. 3.3.

V tabulce se objeví ostatní hodnoty, pro další zpracování úlohy, konkrétně střední hodnota užitečného průměru, hodnota směrodatné odchylky a hodnota pro určení intervalu spolehlivosti. Tyto hodnoty jsou následně převedeny do datové oblasti, která je ohraničena modrou barvou a slouží jako zdroj dat pro vykreslení grafických závislostí. Grafy jsou naformátovány pro dobrou čitelnost formátu A4 a dostatečnou čitelnost pro formát A5. Nacházejí se přímo pod datovou oblastí.

### **List „Posuvy“**

Tato část tabulky slouží pro počítačové zpracování dat při měření závislosti užitečného výkonu na posuvu  $Pu_{\Sigma}=f(f)$ .

- Vyplňování je obdobné s předchozí záložkou, dle následujících bodů :
- Do sloupce C Vyplníme řadu posuvů, při kterých bude měření prováděno.
- Do sloupců D a M vyplníme hodnoty odečtené při chodu naprázdno, obdobně jako u předchozí záložky. Tentokrát stačí 1 sada hodnot pro celé měření.
- Do sloupců F, P, X následně zapisujeme odečítané hodnoty počtu dílků n13, příkonu P15 a zapisujeme hodnoty řezné síly F15 dle kap. 3.3.

Umístění datové oblasti a grafů je shodné s předchozí záložkou.

### **List „Tříska ap“**

- Vyplňování je obdobné s první záložkou, dle následujících bodů :
- Do sloupce C vyplníme řadu hodnot hloubky řezu, při kterých budeme měřit
- Do sloupců D a N vyplníme hodnoty odečtené při chodu naprázdno, obdobně jako u předchozí záložky. Stejně jako u záložky posuvy stačí jedna sada hodnot pro celé měření.
- Do sloupců F, P, X následně zapisujeme odečítané hodnoty počtu dílků n13, příkonu P15 a zapisujeme hodnoty řezné síly F15 dle kap. 3.3.

Umístění datové oblasti a grafů je shodné s předchozí záložkou.

### **List „souhrn výsledků do dokumentu“**

Obsahuje souhrnné tabulky hodnot, naformátované pro vložení do dokumentu formátu A4. Tato tabulka se generuje automaticky.

Obsahuje střední hodnoty užitečného výkonu, včetně hodnot pro určení předepsaného intervalu spolehlivosti. Funkční závislost, pro kterou je tabulka generována, je definována v hlavičce tabulky.

#### List „prázdná tabulka\_tisk“

Obsahuje 1 zcela prázdnou univerzální (viz. tab.8) a 3 předvyplněné tabulky pro ruční zápis a zpracování hodnot. Předvyplněné tabulky mají vyplněnou hlavičku pro námi zvolené nezávislé parametry měření. Tabulky jsou formátovány pro dobrou čitelnost na ve formátu A4.

List „tabulka\_dokumentu“ má pouze navíc předvyplněnou hodnotu nezávislého parametru měření.

### 3.5.1. POSTUP VÝPOČTU, PŘÍKLAD VÝPOČTU [5]

#### Výpočet užitečného výkonu $P_{už}$ [W] pro měření měřicím kufrem

Vstupní hodnoty viz tab 5.

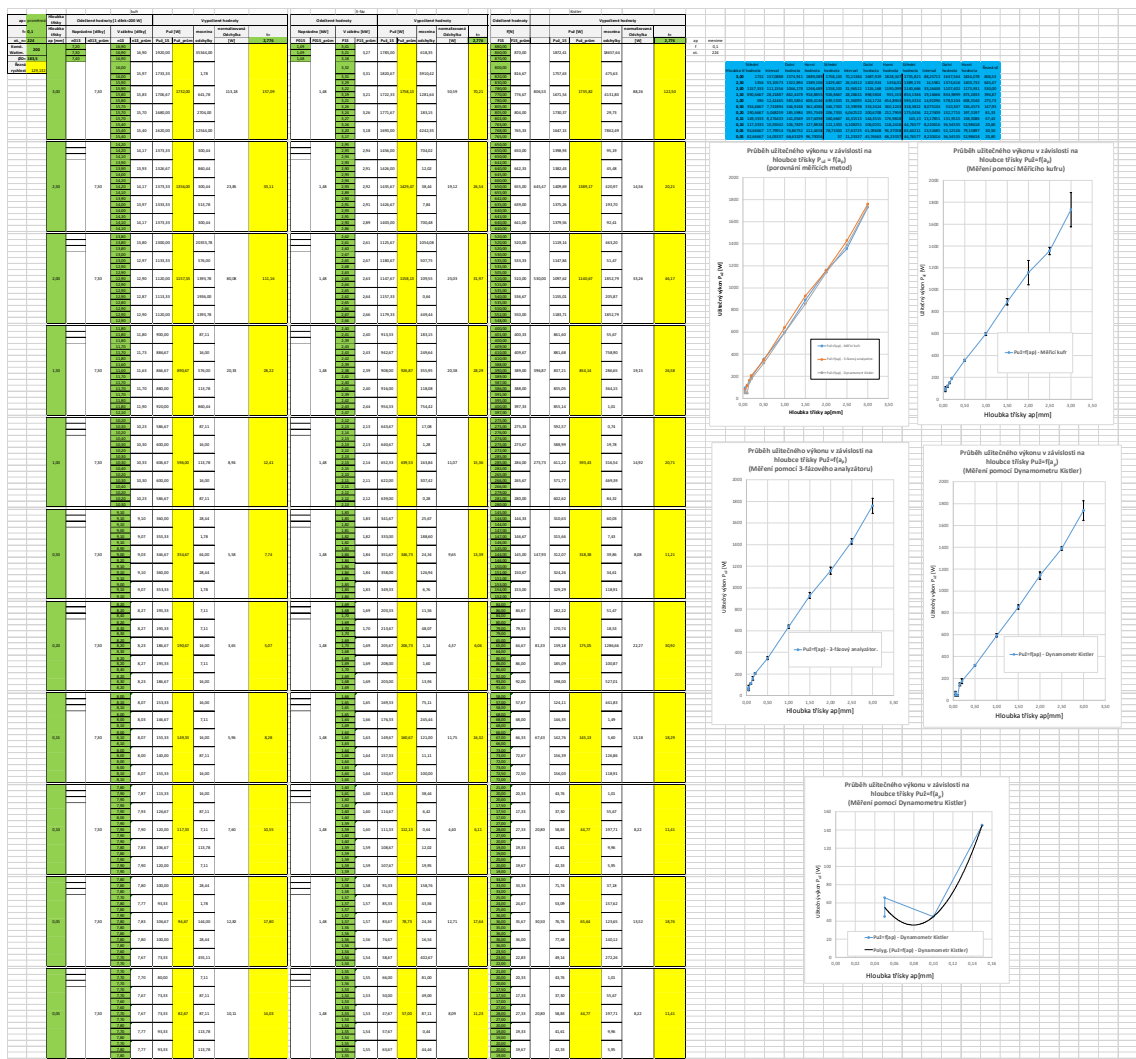
Pro přepočet užitečného výkonu při měření 3-fáz. analyzátozem a měřicím kufrem je třeba zohlednit příkon naprázdno a tento odečíst, viz 2.2.5., vzorec 17.

$$P_{už} = P_e - P_0 = 200 \cdot (\overline{n_{13}} - \overline{n_{013}}) = 200 \cdot (7,35 - 5,83) = 240 \text{ [W]}$$

Otáčky	Řezná rychlost	Odečtené hodnoty [1 dílek=200 W]			
		Naprázdno [dílky]		V záběru [dílky]	
n [ot / min]	vc [m / min]	n013	n013_prům	n13	n13_prům
56,00	32,28	5,90	5,83	7,10	7,35
		5,70		7,85	
		5,90		7,10	
				7,00	7,47
				8,40	
				7,00	
				7,00	8,03
				10,00	
				7,10	
				7,10	7,37
				8,00	
				7,00	
				7,10	8,07
				10,00	
				7,10	

Tab. 5 - Tabulka vstupních hodnot - měřeno měřicím kufrem





Obr. 40 – Rozmístění jednotlivých částí výpočtové tabulky v rámci listu

**Přepočet výkonu  $P_{u\dot{z}15}$  [W] z řezné síly  $F_c$  [N] pro měření Dynamometrem**

Vstupní hodnoty viz tab. 6.

$$P_{u\dot{z}15} = F_c \cdot v = \frac{\bar{F}_{15} \cdot \pi \cdot \phi D [m] \cdot n}{60} = \frac{466,67 \cdot \pi \cdot 0,1835 \cdot 56}{60} = 251,09 \text{ [W]}$$

**Určení aritmetického průměru užitečného výkonu  $P_{u\dot{z}}$**

$$\bar{P}_{u\dot{z}} \sim \bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} = \frac{251,09 + 222,75 + 229,93 + 230,46 + 240,87}{5} = 235,02 \text{ [W]}$$

**Určení směrodatné odchylky**

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{X})^2}{n-1}} =$$

$$= \sqrt{\frac{(251,09 - 235,02)^2 + (222,75 - 235,02)^2 + \dots + (240,87 - 235,02)^2}{5-1}} =$$

$$= 11,06$$

Otáčky		Odečtené hodnoty			Vypočtené hodnoty							
Otáčky	Řezná rychlost	Fc[N]			Puž [W]		mocnina	normalizovaná Odchylka	t=			
n [ot / min]	vc [m / min]	F15	F15_prům		Puž_15	Puž_prům	odchylky	[W]	2,776			
56,00	32,28	461,00	466,67	436,80	251,09	235,02	258,24	11,06	15,36			
		455,00										
		484,00										
		410,00	414,00		222,75		150,49					
		415,00										
		417,00										
		412,00	427,33		229,93		25,94					
		430,00										
		440,00										
		440,00	428,33		230,46		20,75					
		420,00										
		425,00										
		455,00	447,67		240,87		34,19					
		444,00										
		444,00										

Tab 6 - Vzorová tabulka hodnot pro dané parametry, měření Dynamometrem

Určení tzv. Studentova koeficientu  $t_{n-1(97,5)}$  z tabulek, viz tab. 7

Počet stupňů volnosti:  $n-1=4$

Studentův koeficient:  $t_{0,975}=2,776$

Stupně volnosti	$t_{0,25}$	$t_{0,10}$	$t_{0,05}$	$t_{0,025}$	$t_{0,01}$	$t_{0,005}$	$t_{0,001}$	$t_{0,0005}$	$t_{0,0001}$
1	1.000	3.078	6.314	12.706	31.821	63.657	127.320	318.309	636.619
2	0.816	1.886	2.920	4.303	6.965	9.925	14.089	22.327	31.599
3	0.765	1.638	2.353	3.182	4.541	5.841	7.453	10.214	12.924
4	0.741	1.533	2.132	2.776	3.747	4.604	5.598	7.173	8.610

Tab 7 - Tabulka kritických hodnot Studentova t-rozdělení- výtah [5]

Výpočet 95% intervalu spolehlivosti

$$P_{už} = \bar{X} \pm t_{n-1(97,5)} \cdot \frac{s}{\sqrt{n-1}} = 235,02 \pm 2,776 \cdot \frac{11,06}{\sqrt{5-1}} = 235,02 \pm 15,36 \text{ [ W ]}$$

Výsledná hodnota je určena jako interval ve kterém se s 95% pravděpodobností nachází hodnota skutečná.

Válcové soustružení							
Stroj	Univerzální soustruh						
Nástroj	Soustružnický nůž	držák břitové destičky břitová destička					
Obrobek	průměr	d [mm]			Úhly řezného nástroje		
	materiál				α <sub>0</sub> [°C] - hřbet	γ <sub>0</sub> [°C] - čelo	
prostředí	procesní kapalina						
	teplota okolí	[°C]					
Měřené parametry	Otáčky	n [min <sup>-1</sup> ]				strana	
	Posuv	f [mm.ot <sup>-1</sup> ]					
	Řezná rychlost	v [m.min <sup>-1</sup> ]					
	Hloubka záběru	ap [mm]					
	síla výkon	F [N]					
Měřicí kufr				3-fázový analyzátor			Dynamometr
Otáčky	Naprázdno	V záběru		Naprázdno	V záběru		F[N]
n [ot/min]	n <sub>0</sub> [dílky]	n <sub>15</sub> [dílky]		P <sub>0</sub> [kW]	P <sub>15</sub> [kW]		F <sub>15</sub> [N]
n [ot/min]	n <sub>0</sub> [dílky]	n <sub>15</sub> [dílky]	P <sub>0</sub> [kW]	P <sub>15</sub> [kW]	F <sub>15</sub> [N]		

## 4. REALIZACE EXPERIMENTŮ, MĚŘENÍ

Veškeré použité stroje a zařízení jsou součástí vybavení laboratoře katedry obrábění a montáže na Technické univerzitě v Liberci.

### 4.1. STROJ

Pro měření byl použit univerzální soustruh **SU 50 / 1500** (obr. 40, 41) od výrobce **TOS LIPNÍK**, jehož parametry jsou uvedeny v tabulce 1. Soustruh je součástí vybavení laboratoře TUL. Je osazen univerzálním sklíčidlem, koníkem nesoucím pinolu v níž je upnut hrot, sloužící k opření dlouhých obrobků.



Obr. 41 – Univerzální soustruh SU 50/1500 laboratoř TUL-foto

### 4.2. NÁSTROJ

Nástrojem byl v souladu s metodikou soustružnický nůž CTAPR 2020 K 16, viz obr. 42 osazený výměnnou destičkou TPUN 160308 jejíž vyobrazení a parametry lze nalézt v tabulce č. 3, kapitola 3.1. Během experimentu byla před každou sadou měření vyměněna břitová destička z důvodu zajištění shodných podmínek po celou dobu experimentu. Nástroj byl upnut 2-mi šrouby a pomocí držáku nástroje Type 9441, který zajistil jeho připojení k dynamometru Kistler. (viz. Obr. 43)



Obr. 42 – Soustružnický nůž CTAPR 2020 K 16 použitý k experimentu-foto



Obr. 43 – Dynamometr Kistler 9265B + držák nástroje Type 9441B - foto

### 4.3. OBROBEK

Materiálem pro experiment byl zvolen obrobek kruhového průřezu ze standardní konstrukční uhlíkové oceli viz. obr. 44. Vzhledem k tomu, že úkolem nebylo změřit konkrétní hodnoty, ale provést srovnání jednotlivých metod není volba materiálu nikterak zásadní pro výsledek experimentu. Obrobek byl upnut za vnější průměr a opřen o hrot. Experimentální plocha obrobku byla obrobena na konstantní průměr tak, aby se předešlo



možnosti ovlivnění výsledku kolísáním hloubky řezu  $a_p$ , způsobeného nerovnoměrností tvaru obrobku.

#### **Rozměr a materiál obrobku:**

Průměr obrobku  $D = 183,5$  [mm]

Materiál obrobku: 12050.1 – konstrukční uhlíková ocel



**Obr. 44 – Obrobek připravený k experimentu**

## **4.4. MĚŘICÍ PŘÍSTROJE**

### **4.4.1. MĚŘICÍ KUFR**

Měřicí kufr byl v souladu s metodikou připojen na přívod k soustruhu a k měření byla použita konstanta přístroje 200. Pro měření byl použit jeho sdružený wattmetr. (Obr 31)

### **4.4.2. 3-FÁZOVÝ ANALYZÁTOR**

3- fázový analyzátor byl připojen na přívod k soustruhu v konfiguraci dle obr. 45, 46. Jeho měřicí rozsah byl nastaven na 0-9.999 kW.



Obr. 45 – 3-fáz. Analyzátor foto



Obr. 46 – 3-fáz. Analyzátor celková konfigurace [12]

#### 4.4.3. DYNAMOMETR KISTLER

Dynamometr byl použit v konfiguraci popsané v metodické části, kap. 3.2.3., obr. 33,34. Při zahájení byl již kalibrován pomocí siloměru na obr. 35, a proto nebylo nutné kalibraci provádět znova. Konfigurace použitého dynamometru včetně upnutého nástroje je zřejmá z obr. obr. 41,43,44.

### 4.5. DEFINICE ROZSAHU MĚŘENÝCH HODNOT

Vzhledem k tomu, že hlavním cílem měření je srovnání jednotlivých metod a vyhodnocení jejich přesnosti je zásadní aby měření probíhalo při identických řezných podmínkách, nejlépe všemi měřicími přístroji současně. Cílem měření je získat toto srovnání, nikoliv vlastní hodnoty, proto nejsou řezné podmínky nikterak předem specifikovány. Měly by svým rozsahem pokrývat v maximálním rozsahu možnosti obráběcího systému a měřících přístrojů.

**Rozsah vstupních hodnot pro nezávislé parametry měření byl zvolen :**

1. Otáčky  $n = 56-450 \text{ [min}^{-1}\text{]}$ , tzn. řezná rychlost  $v_c \sim 32-260 \text{ [m.min}^{-1}\text{]}$   
Řada:  $n=56;71;90;112;140;180;224;280;355;450 \text{ [ot}^{-1}\text{]}$
2. Posuv  $f=0,06-0,48 \text{ [mm.ot}^{-1}\text{]}$   
Řada  $f=0,06;0,1;0,15;0,2;0,25;0,30;0,35;0,4;0,43;0,48 \text{ [mm.ot}^{-1}\text{]}$
3. Hloubka řezu  $a_p = 0,05-3 \text{ [mm]}$ .  
Řada  $a_p=3;2,5;2,0;1,5;1,0;0,5;0,2;0,15;0,10;0,005 \text{ [mm]}$

Rozsahy byly zvoleny s ohledem na použitou výměnnou břitovou destičku a její krajní hodnoty pro jednotlivé řezné parametry, viz kap. 3.1.

## 4.6. PŘEHLED A VYHODNOCENÍ NAMĚŘENÝCH HODNOT

### 4.6.1. Měření závislosti $P_{už}$ na řezné rychlosti

$P_{už}=f(v_c)$			Měřicí kufr		3-fázový analyzátor		Dynamometr Kistler			
Řezné podmínky	Otáčky	Řezná rychlost	Střední hodnota	Interval	Střední hodnota	Interval	Střední hodnota		Interval	Rozdíl max/min
	n [ot.min <sup>-1</sup> ]	n [m.min <sup>-1</sup> ]	$P_{už15}$ [W]	[W]	$P_{už15}$ [W]	[W]	$P_{už15}$ [W]	$F_c$ [N]	[W]	[%]
Hloubka řezu	56,00	32,28	230,67	10,55	256,00	11,82	233,24	433,50	13,86	10,98
$a_p$ [mm]	71,00	40,93	245,33	20,06	290,60	6,27	283,81	416,03	9,00	18,45
1,5	90,00	51,88	380,00	14,63	370,47	22,66	345,20	399,20	13,08	10,08
Posuv	112,00	64,57	480,00	23,59	473,87	14,90	438,40	407,40	11,05	9,49
$f$ [ot <sup>-1</sup> ]	140,00	80,71	572,00	26,50	651,40	63,09	535,18	397,87	21,07	21,72
0,1	180,00	103,77	736,67	26,17	732,33	77,82	700,20	404,87	8,70	5,21
	224,00	129,13	837,33	10,55	928,80	27,65	846,82	393,47	11,16	10,92
	280,00	161,42	1018,67	20,06	1207,60	20,54	1093,68	406,53	24,56	18,55
	355,00	204,65	1432,00	46,45	1582,67	38,10	1369,34	401,47	17,18	15,58
	450,00	259,42	1968,00	20,06	1908,67	38,57	1693,13	391,60	22,86	16,23

Tab. 9 – Naměřené hodnoty  $P_{už}$  v závislosti na řezné rychlosti  $v_c$

Z naměřených hodnot, uvedených v tab. 9 graficky znázorněných grafy na obr. 47-49 je zřejmý stoupající trend hodnot užitečného výkonu. Z níže uvedených grafů je zřejmá přímá, přibližně lineární závislost užitečného výkonu na řezné rychlosti, zcela dle předpokladů uvedených v kap. 2.2.4 a vyplývajících ze vztahů 13-15. Zajímavým zjištěním je i závislost řezné síly na řezné rychlosti, z níž je patrný její zpomalující se pokles přesně dle kap. 2.2.5.5., obr. 19. Příčinnou tohoto poklesu je zvyšování plasticity materiálu díky nárůstu teploty vlivem obrábění. Tento jev je zaznamenán v grafu na obr. č.50 a je proložen křivkou. Pokles je v námi zvoleném rozsahu měření menší než 10 %, proto se nijak významně neprojevuje na průběhu užitečného výkonu, který ve stejném rozsahu vzroste přibližně 8x. Je zcela zřejmé, že v případě závislosti  $P_{už}=f(v_c)$  má zásadní vliv na hodnotu užitečného výkonu použitá řezná rychlost.

### 4.6.2. MĚŘENÍ ZÁVISLOSTI $P_{už}$ NA POSUVU

Hodnoty závislosti užitečného výkonu na strojním posuvu, zaznamenané v tab. 9 vykazují v případě měření všemi třemi metodami podobný, přibližně lineární průběh, s mírně odlišným stoupáním křivky, patrný z grafů na obr 51-53. Toto zcela potvrzuje poznatky zmíněné v kap. 2.2.5.5., obr. 15. Po celou dobu měření jsme se pohybovali v pásmu linearity ( $f=0,05 \div 1$  mm.ot<sup>-1</sup>), což potvrzují i naměřené průběhy závislosti  $P_{už}=f(f)$ . Vzhledem ke konstantní řezné rychlosti  $v_c$  a hloubce řezu  $a_p$  je zřejmé, že hlavní



vliv na velikost užitečného výkonu  $P_{už}$  má velikost řezné síly  $F_c$ , přesně dle poznatků uvedených v kap. 2.4.5.5.

$P_{už}=f(f)$		Měřicí kufr		3-fázový analyzátor		Dynamometr Kistler			
Řezné podmínky	Posuv	Střední hodnota $P_{už15}$ [W]	Interval [W]	Střední hodnota $P_{už15}$ [W]	Interval [W]	Střední hodnota		Interval [W]	Rozdíl max/min [%]
	$f$ [mm.ot <sup>-1</sup> ]					$P_{už15}$ [W]	$F_c$ [N]		
Hloubka řezu	0,06	525,33	20,59	541,93	31,89	519,68		28,95	4,28
$a_p$ [mm]	0,10	891,33	26,70	943,93	28,78	861,45		16,76	9,57
1,5	0,15	1283,33	13,88	1383,93	17,22	1251,43		34,61	10,59
Otáčky	0,20	1567,33	12,41	1698,27	29,52	1534,95		39,18	10,64
$n$ [min <sup>-1</sup> ]	0,25	1793,33	19,63	1950,07	90,08	1722,76		11,14	13,19
224	0,30	2131,33	148,33	2231,67	90,43	2041,29		116,35	9,33
Řezná rychlost	0,35	2319,33	12,41	2488,00	27,54	2233,27		32,57	11,41
$v_c$ [m.min <sup>-1</sup> ]	0,40	2665,33	70,36	2833,00	44,80	2522,24		43,10	12,32
	0,43	2805,33	75,00	2995,60	23,21	2676,33		34,48	11,93
129,13	0,48	3027,33	86,46	3247,73	88,24	2919,10		28,90	11,26

Tab. 10 – Naměřené hodnoty  $P_{už}$  v závislosti na posuvu  $f$

#### 4.6.3. MĚŘENÍ ZÁVISLOSTI $P_{už}$ NA HLOUBCE ŘEZU

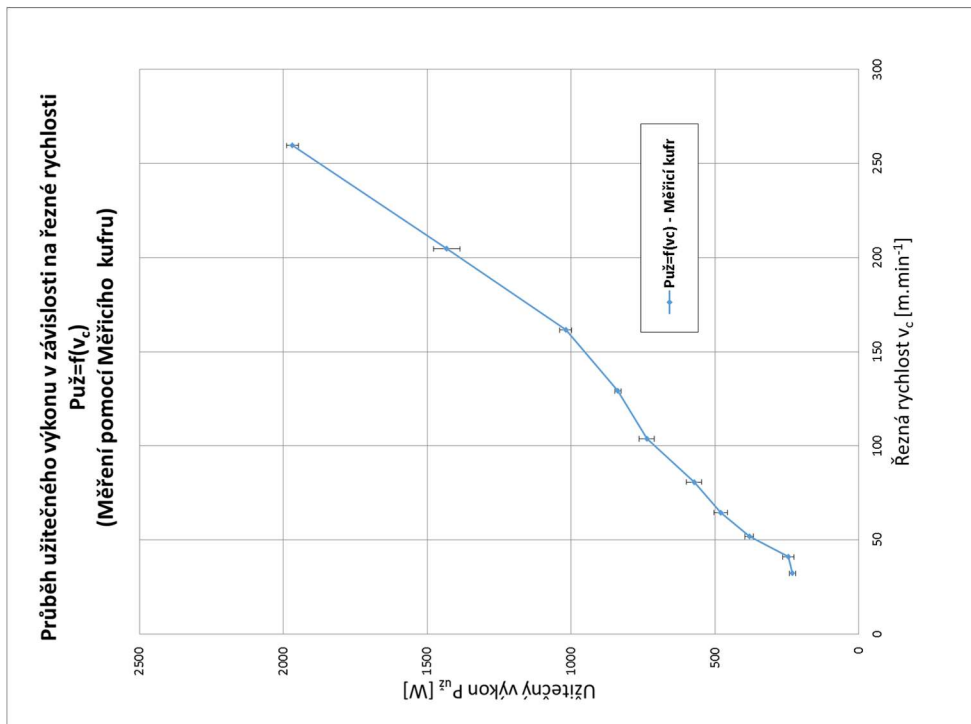
$P_{už}=f(a_p)$		Měřicí kufr		3-fázový analyzátor		Dynamometr Kistler			
Řezné podmínky	Hloubka třísky	Střední hodnota $P_{už15}$ [W]	Interval [W]	Střední hodnota $P_{už15}$ [W]	Interval [W]	Střední hodnota		Interval [W]	Rozdíl max/min [%]
	$a_p$ [mm]					$P_{už15}$ [W]	$F_c$ [N]		
Posuv	3,00	1732,00	157,09	1758,13	70,21	1735,82		88,26	1,51
$f$ [ot <sup>-1</sup> ]	2,50	1356,00	33,11	1429,47	26,54	1389,17		14,56	5,42
0,1	2,00	1157,33	111,16	1158,13	31,97	1140,67		33,26	1,53
Otáčky	1,50	890,67	28,22	926,87	28,29	854,14		19,15	8,52
$n$ [min <sup>-1</sup> ]	1,00	596,00	12,41	639,53	15,36	593,43		14,92	7,77
224	0,50	354,67	7,74	346,73	13,39	318,38		8,08	11,40
Řezná rychlost	0,20	190,67	5,07	206,73	6,06	175,05		22,27	18,10
$v_c$ [m.min <sup>-1</sup> ]	0,15	149,33	8,28	160,67	16,32	145,13		13,18	10,71
	0,10	117,33	10,55	112,13	6,11	44,77		8,22	162,11
129,13	0,05	94,67	17,80	78,73	17,64	65,64		13,52	44,22

Tab. 11 – Naměřené hodnoty  $P_{už}$  v závislosti na hloubce řezu  $a_p$

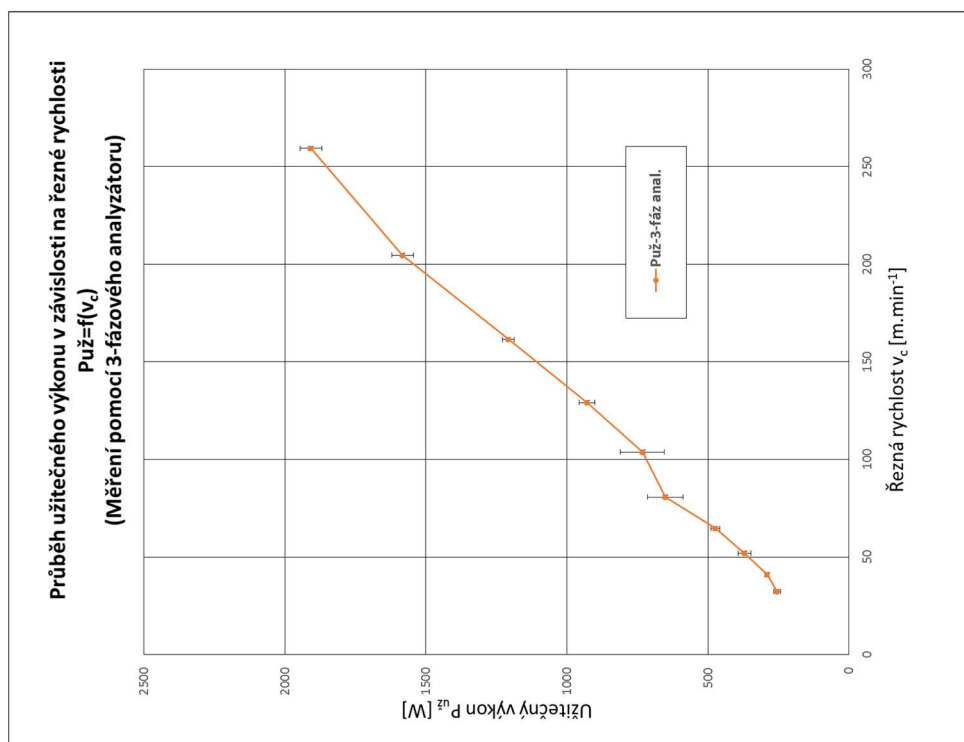
Také průběhy závislosti užitečného výkonu na hloubce řezu, zaznamenané v tab. 11 vykazují v případě měření všemi třemi metodami podobný, přibližně lineární průběh. Měření potvrzují platnost teoretických předpokladů z kapitoly 2.2.5.5. a grafu na obr. 15. Vzhledem ke konstantní řezné rychlosti a posuvu je opět zřejmé, že hlavní vliv na velikost užitečného výkonu  $P_{už}$  má velikost řezné síly  $F_c$ , což při konstantní hodnotě strojního posuvu  $f$  potvrzuje její závislost na hodnotě hloubky řezu  $a_p$ . Grafické závislosti jsou zaznamenané v grafech na obr. 54-56. Hodnoty naměřené dynamometrem Kistler potvrzují i předpoklad nárůstu řezné síly při obrábění s hloubkou řezu  $a_p \leq 0,05$  mm, viz. obr. 57. K tomuto dochází vlivem nárůstu podílu třecích sil

dle kap. 2.2.5.5. Měřením výkonu přímou metodou, tzn. měřícím kufrem a analyzáteorem nebyl tento jev zaznamenán.

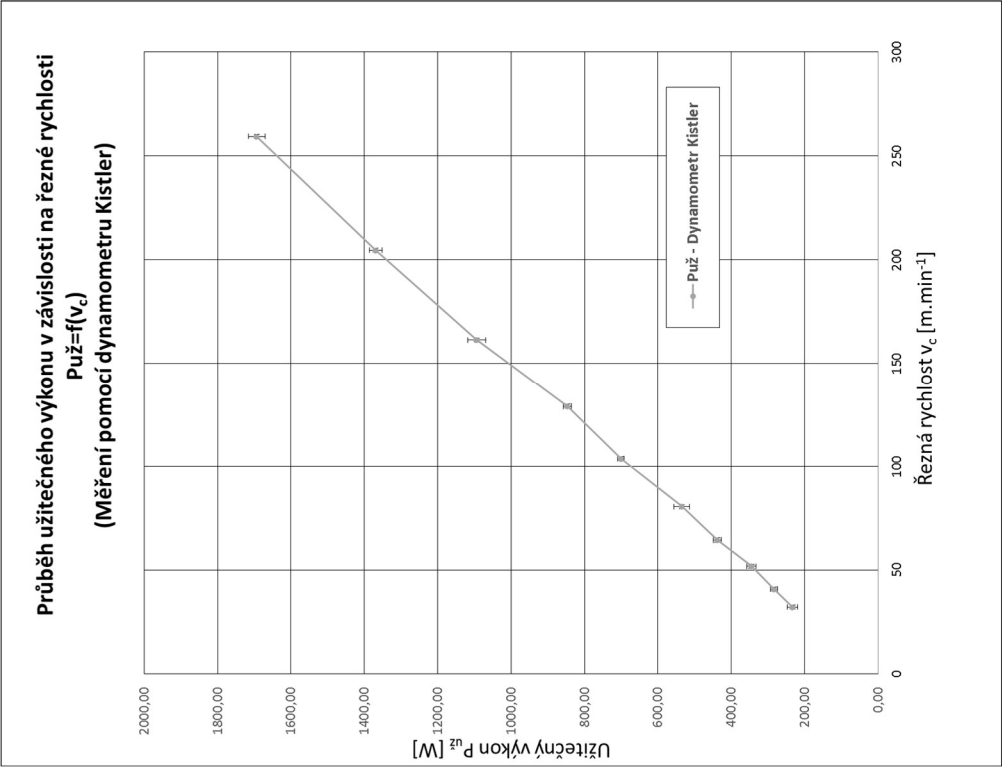
#### 4.6.4. GRAFICKÉ ZNÁZORNĚNÍ NAMĚŘENÝCH HODNOT



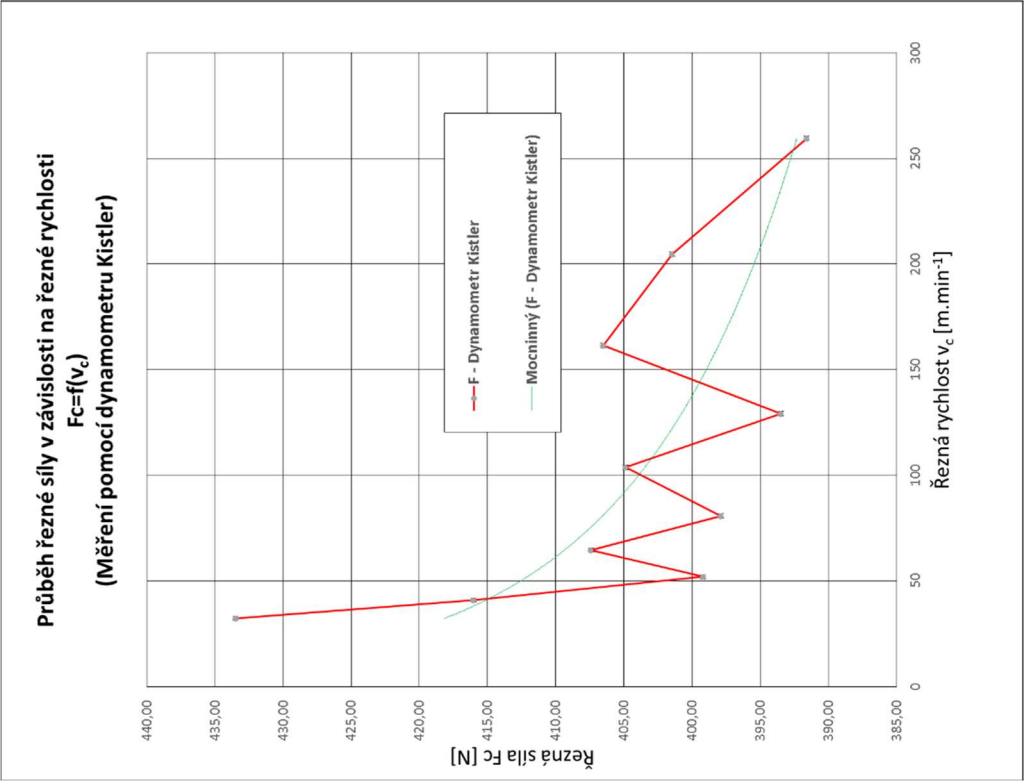
Obr. 47 – Graf závislosti  $P_{už} = f(v_c)$  – měřeno měřícím kufrem



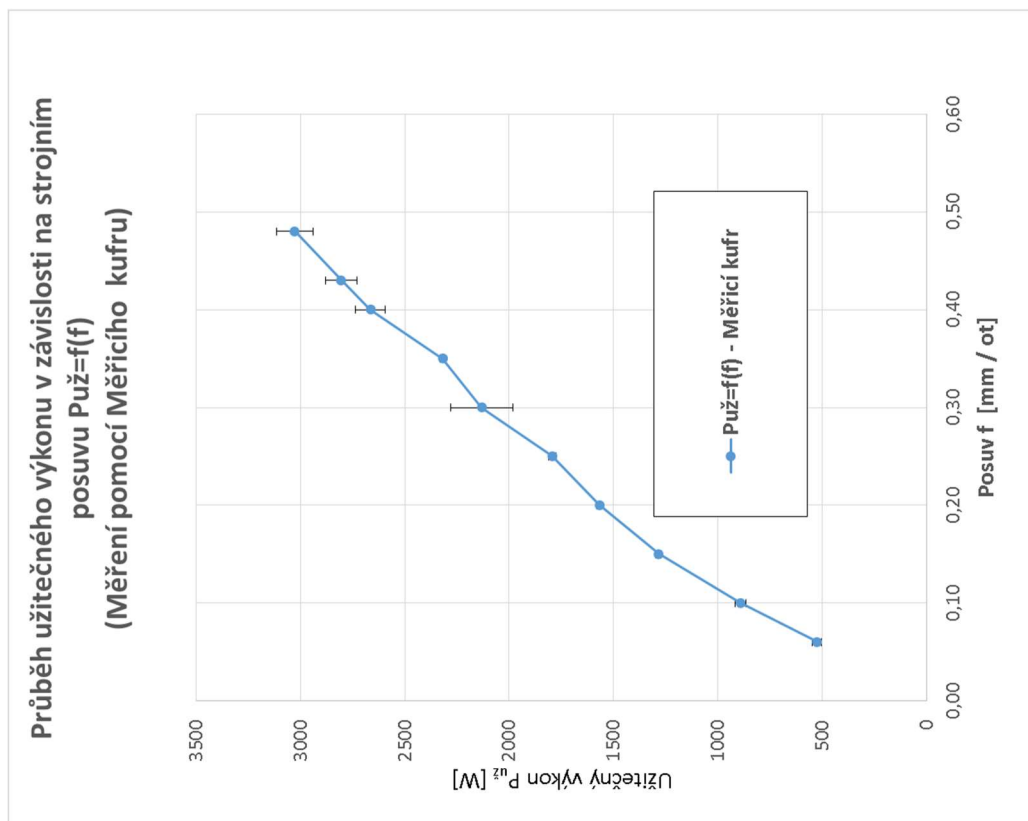
Obr. 48 – Graf závislosti  $P_{už} = f(v_c)$  – měření 3-fázovým analyzáteorem



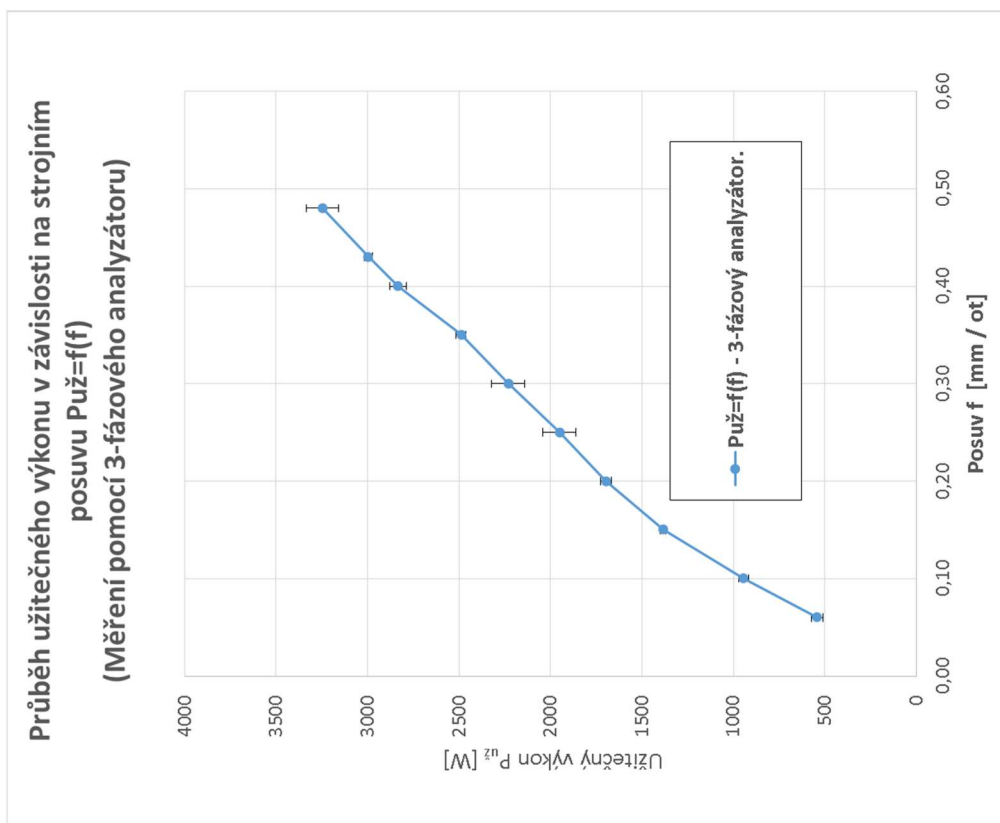
Obr. 49 – Graf závislosti  $P_{už} = f(v_c)$  – měření Dynamometrem



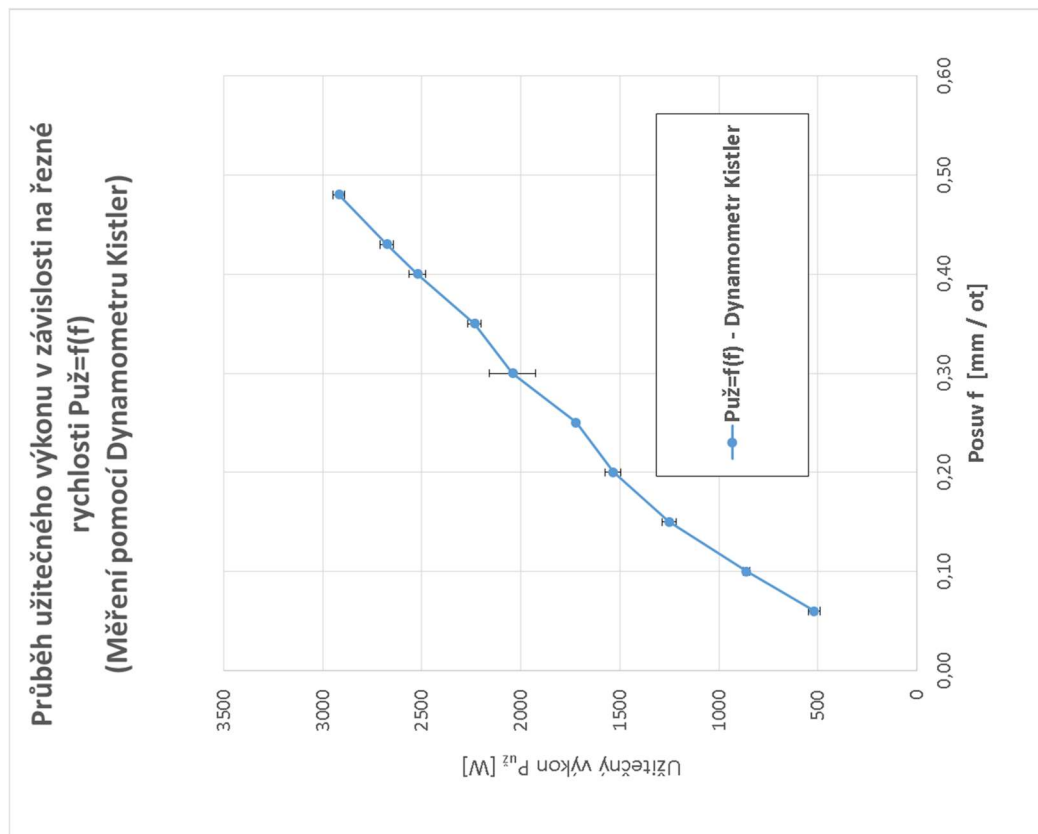
Obr. 50 – Graf závislosti  $F_c = f(v_c)$  – měřeno Dynamometrem Kistler



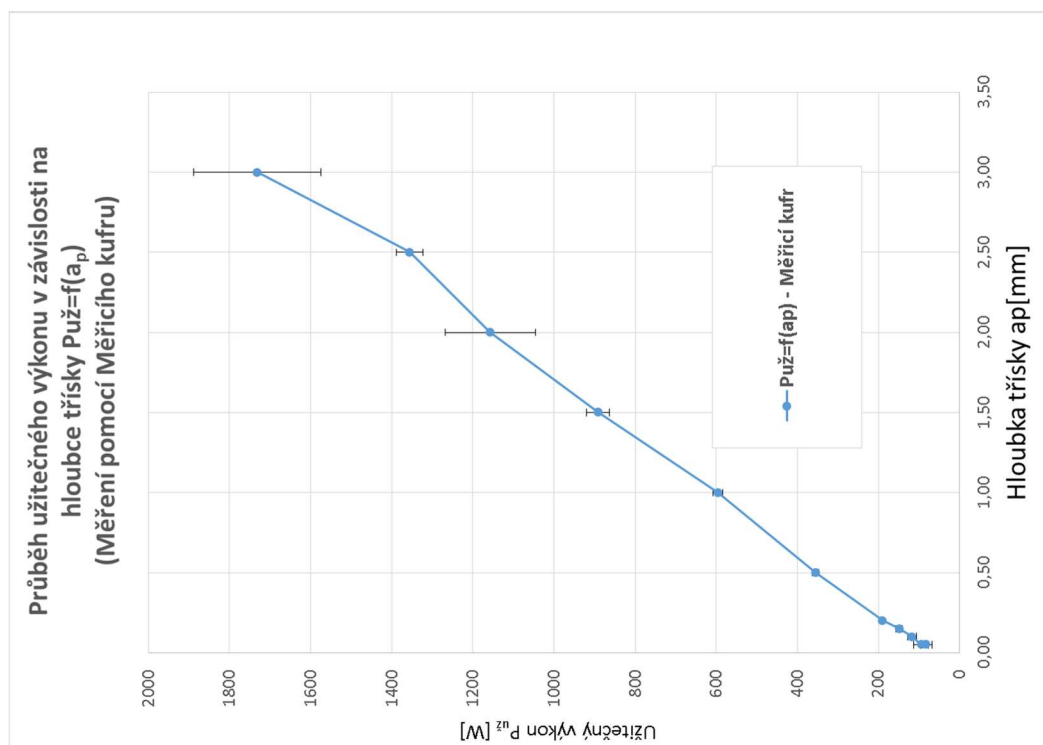
Obr. 51 – Graf závislosti  $P_{už} = f(f)$  – měřeno měřicím kufr



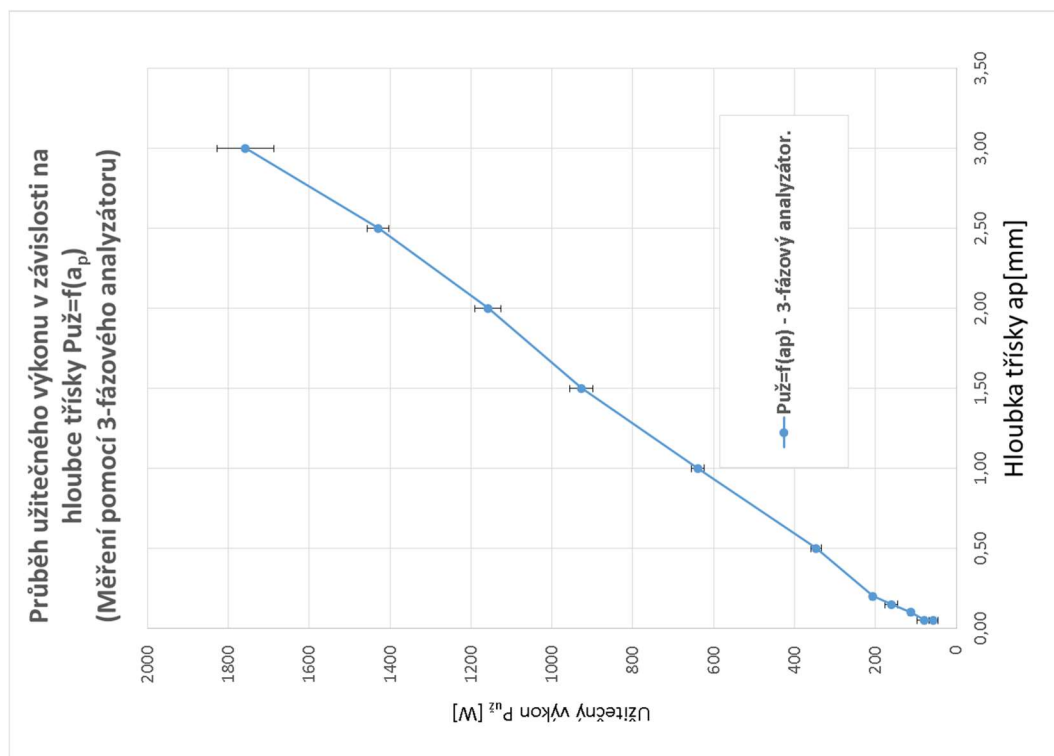
Obr. 52 – Graf závislosti  $P_{už} = f(f)$  – měřeno 3-fáz. analyzáto



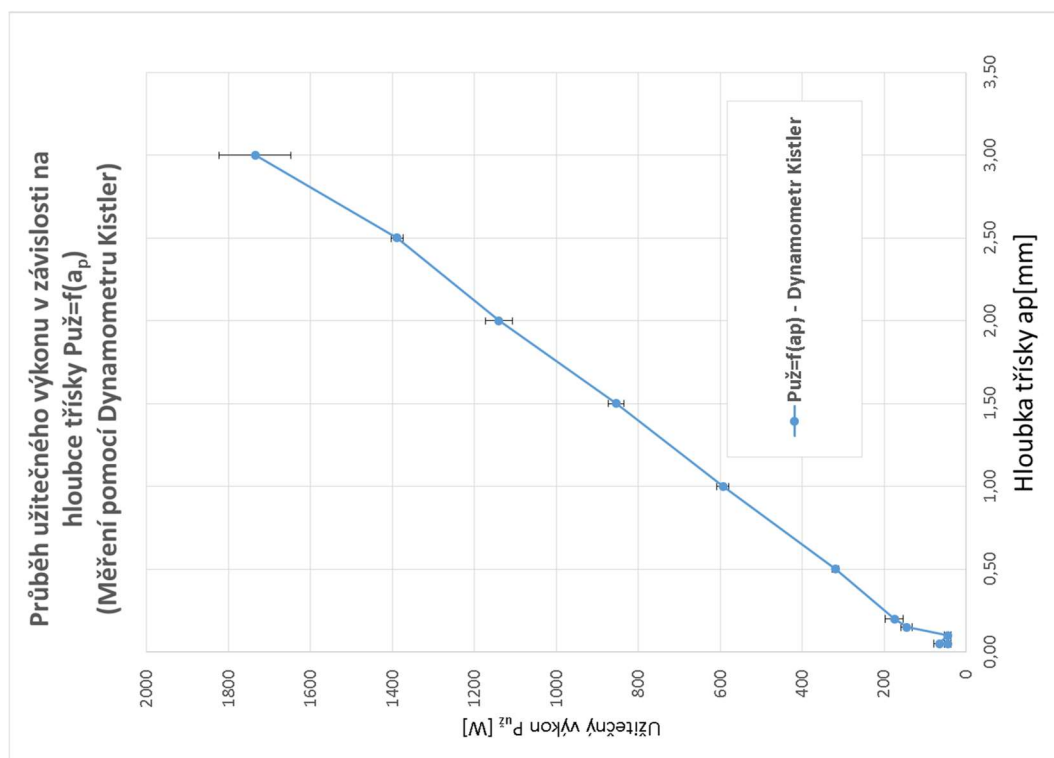
Obr. 53 – Graf závislosti  $P_{uz} = f(f)$  – měřeno Dynamometrem Kistler



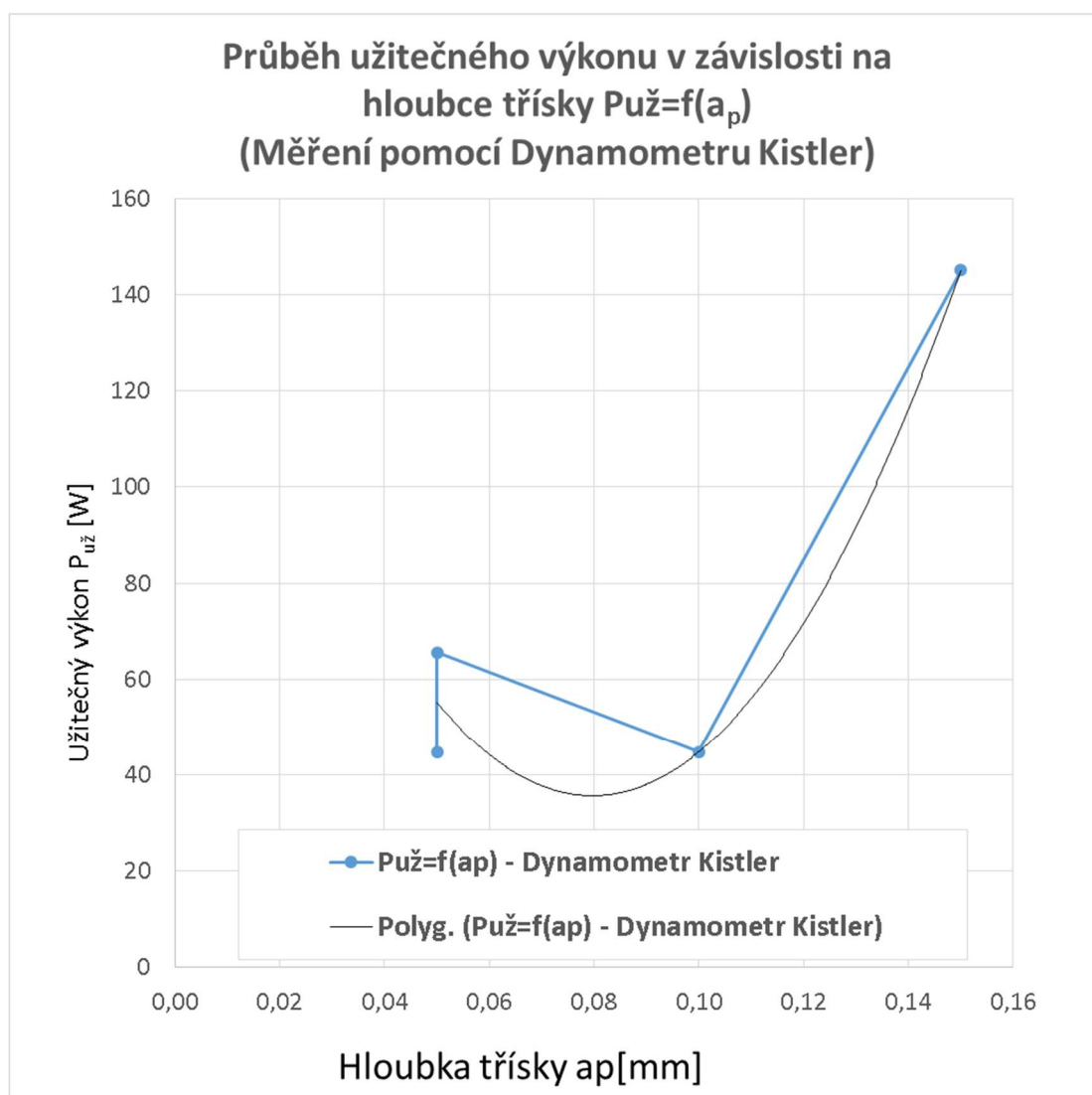
Obr. 54 – Graf závislosti  $P_{uz} = f(a_p)$  – měřeno měřícím kufr



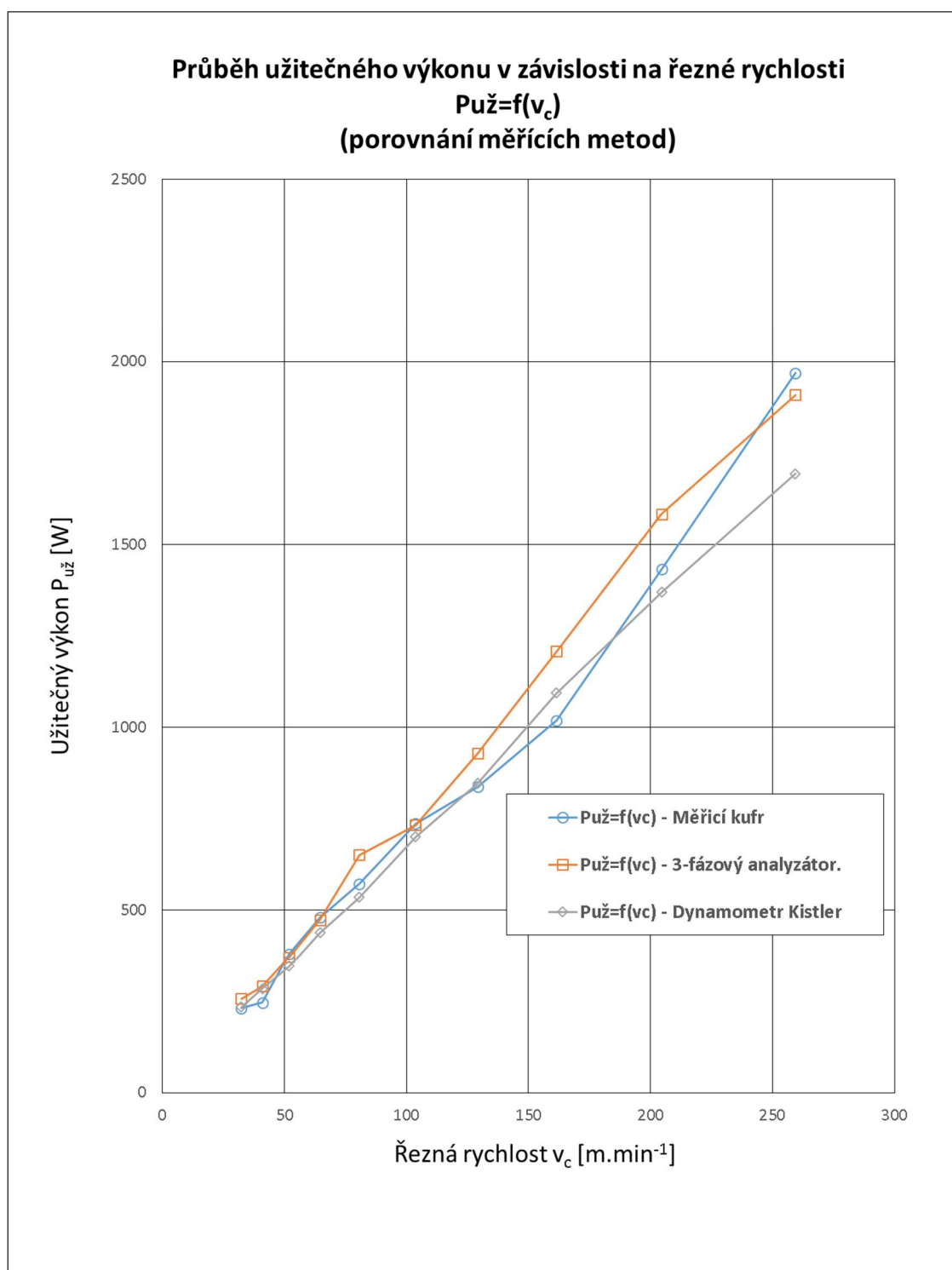
Obr. 55 – Graf závislosti  $P_{už} = f(a_p)$  – měřeno 3-fázovým analyzátozem



Obr. 56 – Graf závislosti  $P_{už} = f(a_p)$  – měřeno Dynamometrem Kistler

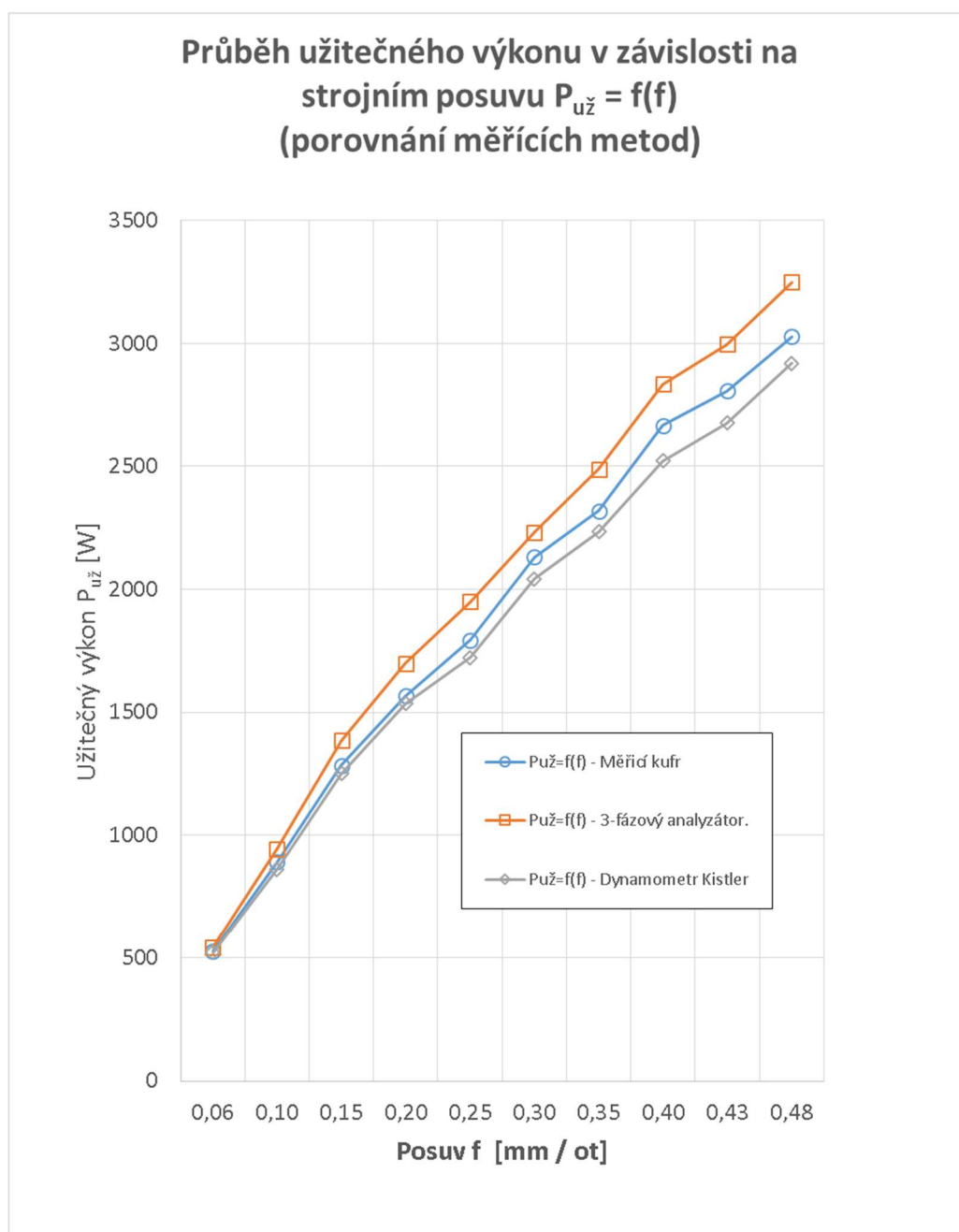


**Obr. 57 – Graf závislosti  $P_{už} = f(a_p)$  v oblasti nárůstu podílu pasivních sil**

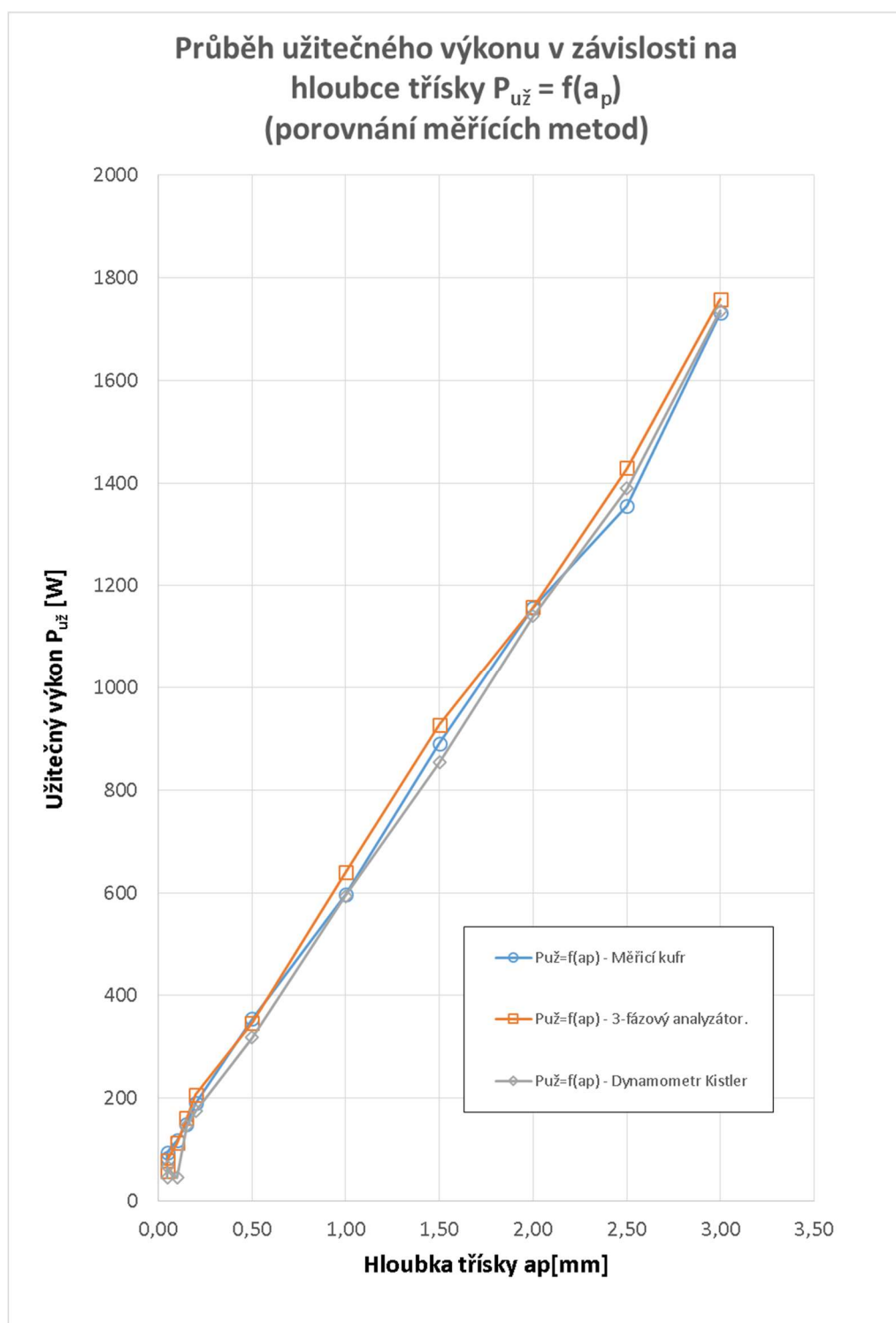


**Obr. 58 – Graf průběhů  $P_{už}$  pro jednotlivé měřící metody v závislosti na  $v_c$**





**Obr. 59 – Graf průběhů  $P_{už}$  pro jednotlivé měřící metody v závislosti na posuvu  $f$**



**Obr. 60 – Graf průběhů  $P_{už}$  pro jednotlivé měřící metody v závislosti na hloubce třísky  $a_p$**

## 5. VYHODNOCENÍ, ZÁVĚR

Hlavním úkolem této bakalářské práce bylo vzájemně porovnat metody měření užitečného výkonu, používané na TUL. Současně bylo splněno i několik dílčích cílů, definovaných v úvodu této bakalářské práce. Cíle byly vytyčeny takto:

- 1) Porovnání jednotlivých metod měření na základě naměřených výsledků a jejich vhodnosti použití pro měření užitečného výkonu.

Jedná se o:

Metody pro přímé měření užitečného výkonu

- Měření výkonu měřicím kufrem
- Měření výkonu 3-fázovým analyzátozem

Metodu pro nepřímé měření užitečného výkonu

- Měření řezné síly dynamometrem Kistler

- 2) Volba hlavních nezávislých parametrů, ovlivňujících velikost výkonu při obrábění a jejich rozsahu pro měření.
- 3) Změření závislosti výkonu při soustružení na zvolených řezných parametrech, jednotlivými metodami, používanými na TUL.
- 4) Zpracování algoritmu pro zpracování naměřených hodnot v prostředí programu MS Excel pro použití při opakovaných měřeních.
- 5) Shrnutí naměřených výsledků, vyvození závěrů, s ohledem na teoretické poznatky.

Jako **nezávislé parametry** měření byly na základě znalostí získaných rešeršní činností v kap. 3. 3. zvoleny řezná rychlost  $v_c$ , posuv  $f$  a hloubka řezu  $a_p$ .

Následná **měření užitečného výkonu** byla provedena pro zvolené hodnoty těchto řezných podmínek dle kap.4.5. za použití strojního vybavení a měřicích metod používaných na TUL a zpracována do tab.9 -11 a grafů na obr. 47-60.

1. Otáčky  $n = 56-450$  [min<sup>-1</sup>], tzn. řezná rychlost  $v_c \sim 32-260$  [m.min<sup>-1</sup>]  
Řada:  $n=56;71;90;112;140;180;224;280;355;450$  [ot-1]
2. Posuv  $f=0,06-0,48$  [mm.ot<sup>-1</sup>]  
Řada  $f=0,06;0,1;0,15;0,2;0,25;0,30;0,35;0,4;0,43;0,48$  [mm.ot<sup>-1</sup>]
3. Hloubka řezu  $a_p = 0,05-3$  [mm].  
Řada  $a_p=3;2,5;2,0;1,5;1;0,5;0,2;0,15;0,10;0,005$  [mm]

Jako součást této práce byl navrhnout **algoritmus** usnadňující opakované zpracování naměřených hodnot. Byl zpracován do tabulky v programu MS Excel, jejíž popis včetně návodu k jejímu použití je obsažen v kapitole 3.6.1. Tabulka je uložena na přiloženém CD.

#### Porovnání metod při měření v závislosti na řezné rychlosti $P_{už}=f(v_c)$

P <sub>už</sub> =f(v <sub>c</sub> )			Měřicí kufr			3-fázový analyzátor			Dynamometr Kistler				
<div>↗ Řezné podmínky ↘</div>	Otáčky	Řezná rychlost	Střední hodnota		Interval	Střední hodnota		Interval	Střední hodnota			Interval	Rozdíl max/min
	n [ot.min <sup>-1</sup> ]	n [m.min <sup>-1</sup> ]	P <sub>už15</sub> [W]		[W]	P <sub>už15</sub> [W]		[W]	P <sub>už15</sub> [W]	F <sub>c</sub> [N]		[W]	[%]
Hloubka řezu	140,00	80,71	572,00	±	26,50	651,40	±	63,09	535,18	397,87	±	21,07	21,72 max
a <sub>p</sub> [mm]	180,00	103,77	736,67		26,17	732,33		77,82	700,20	404,87		8,70	5,21 min
1,5													
Posuv													
f[ot <sup>-1</sup> ]													
0.1													

Tab. 12 – Minimální a maximální podíl změřeného  $P_{už}=f(v_c)$  včetně řezných podmínek

Vstupní hodnoty této části měření jsou obsaženy v tab. 9. a jsou společně graficky znázorněny v grafu na obr. 58. Maximální zjištěný rozdíl činí 21,72 % mezi hodnotami naměřenými 3-fázovým analyzátozem výkonu a měřicím kufrem při řezné rychlosti 80,71 m.min<sup>-1</sup>, jak je patrné i ze zmiňovaného grafu č. 58 a zaneseno v tab. 12. Nejnižšího rozdílu dosahují hodnoty měřené měřicím kufrem a dynamometrem při 103,7 m.min<sup>-1</sup>, konkrétně 5,21%.

Hodnoty změřené přímými metodami vykazují zřetelně vyšší odchylky od lineárního průběhu závislosti.

V případě měřicího kufru hodnoty viditelně kolísají od lineárního průběhu oběma směry, v případě 3-fázového analyzátoru je zřejmá kladná odchylka v oblasti 80-103 m.min<sup>-1</sup>. Tuto skutečnost potvrzují i krajní hodnoty intervalu spolehlivosti, které v daných pásnu dosahují nejvyšších hodnot.

Naopak v případě dynamometru Kistler lze průběh velikosti užitečného výkonu považovat za takřka lineární.

#### Porovnání metod při měření v závislosti na posuvu $P_{už}=f(f)$

V případě průběhu užitečného výkonu v závislosti na posuvu lze v celém průběhu měřených řezných podmínek pozorovat podobný průběh užitečného výkonu pro všechny

P <sub>už</sub> =f(f)		Měřicí kufr		3-fázový analyzátor		Dynamometr Kistler					
Řezné podmínky	Posuv	Střední hodnota	Interval	Střední hodnota	Interval	Střední hodnota		Interval	Rozdíl max/min		
	f[mm.ot <sup>-1</sup> ]	P <sub>už15</sub> [W]	[W]	P <sub>už15</sub> [W]	[W]	P <sub>už15</sub> [W]	Fc[N]	[W]	[%]		
Hloubka řezu	0,06	525,33	±	20,59	541,93	±	31,89	519,68	±	28,95	4,28 min
a <sub>p</sub> [mm]	0.25	1793,33	±	19,63	1950,07	±	90,08	1722,76	±	11,14	13,19 mx
1,5											
Otáčky											
n[ <sup>-1</sup> min]											
224											
Řezná rychlost											
v <sub>c</sub> [ <sup>-1</sup> m.min]											
129,13											

Tab. 13 – Minimální a maximální podíl změřeného  $P_{už}=f(f)$  včetně řezných podmínek

metody, viz tab. 10 + graf na obr.59. Jejich průběhy se liší v zásadě pouze strmostí křivky. Nejvyšších hodnot v celém průběhu dosahují hodnoty měřené pomocí 3-fázového analyzátoru, nejnižších hodnoty měřené dynamometrem Kistler. Nejvyšší rozdíl, 13,19 %, mezi hodnotami byl zjištěn při hodnotě posuvu  $f=0,25 \text{ mm} \cdot \text{ot}^{-1}$ , nejnižší, 4,28 %, při hodnotě posuvu  $f=0,06 \text{ mm} \cdot \text{ot}^{-1}$ , v obou případech se jedná o rozdíl mezi 3-fázovým analyzátozem a dynamometrem Kistler.(viz tab 13.)

#### Porovnání metod při měření užitečného výkonu v závislosti na hloubce řezu $P_{už}=f(a_p)$

P <sub>už</sub> =f(a <sub>p</sub> )		Měřicí kufr		3-fázový analýzátor		Dynamometr Kistler			
Řezné podmínky	Hloubka třísky	Střední hodnota	Interval	Střední hodnota	Interval	Střední hodnota		Interval	Rozdíl max/min
	a <sub>p</sub> [mm]	P <sub>už15</sub> [W]	[W]	P <sub>už15</sub> [W]	[W]	P <sub>už15</sub> [W]	F <sub>c</sub> [N]	[W]	[%]
Posuv	3,00	1732,00		157,09	1758,13	70,21	1735,82	88,26	1,51 min
f[ot <sup>-1</sup> ]	0,20	190,67	±	5,07	206,73	6,06	175,05	22,27	18,10 max1
0,1	0,10	117,33		10,55	112,13	6,11	44,77	8,22	162,11 max3
Otáčkový n[min <sup>-1</sup> ]	0,05	94,67		17,80	78,73	17,64	65,64	13,52	44,22 max2
224									
Řezná rychlost v <sub>c</sub> [m.min <sup>-1</sup> ]									
129,13									

Tab. 14 – Minimální a maximální podíl změřeného  $P_{už}=f(a_p)$  včetně řezných podmínek

Z grafického znázornění na obr. 60 je zřejmé, že hodnoty naměřené jednotlivými metodami mají shodně přibližně lineární průběh. Hodnoty měření jsou zaznamenány v tab. 11 a grafický průběh měření je znázorněn na obr. 60. Nejvyšších procentuálních rozdílů mezi naměřenými hodnotami se vyskytují v pásmu do  $a_p=0,2 \text{ mm}$  a jsou zaneseny v tabulce 14. Maximální odchylka mezi metodami činila 162,11 % při  $a_p=0,1 \text{ mm}$ .

Nejnižšího rozdílu, 1,51%, bylo dosaženo při  $a_p=3\text{mm}$ , tzn. při nejvyšší měřené hodnotě hloubky řezu.

### **Porovnání použitých měřicích metod**

Z provedených měření a z porovnání jejich výsledků vyplývá obecná použitelnost všech tří použitých metod určování užitečného výkonu. V měřených rozsazích řezných podmínek jsou metody srovnatelné. Lze je využívat pro určování hodnot užitečného výkonu při soustružení. Zvýšenou pozornost je ovšem nutné věnovat měření nízkých hodnot užitečného výkonu, při kterých, obzvláště při použití měřicího kufru, může docházet k vysokým nepřesnostem.

Nepřímé metody, tzn. měření pomocí měřicího kufru a 3-fázového analyzátoru lze považovat v principu za rovnocenné, rozdíl mezi nimi tkví hlavně v přesnosti odečítání naměřených hodnot, která je u měřicího kufru při nižších hodnotách měřeného užitečného výkonu z principu nižší než u 3-fázového analyzátoru, protože je výrazně ovlivněna volbou konstanty měření.

Pro měření v oblasti nárůstu podílu pasivních / třecích sil lze s výhodou doporučit měření pomocí dynamometru Kistler, který je jako jediný schopen tento nárůst zaznamenat, viz. obr. 57. Dále lze tento doporučit pro měření výkonů při takových řezných podmínkách, kdy roste podíl rychlosti posuvu resp. přísuvu oproti hlavní řezné rychlosti. Dynamometr je schopen zaznamenávat jednotlivé složky řezné síly, včetně posuvové ( $F_f$ ) a přísuvové ( $F_p$ ) složky řezné síly. Můžeme tedy pro přesnější výpočet užitečného výkonu využít výpočet po jednotlivých složkách, dle vztahu (15).

Celkově lze konstatovat, že v oblasti námi zvolených řezných podmínek je rozdíl mezi jednotlivými metodami nejvíce ovlivněn lidským faktorem, tzn. pečlivostí při měření a při odečítání hodnot. Zásadní je též pečlivá příprava obrobku a nástroje.

Toto vyplývá z naměřených hodnot dle tab. 9-11 a z grafů na obr. 44-57. Současně to potvrzuje i porovnání měření při shodných řezných podmínkách, jejichž hodnoty jsou v tab. 9-11 vyznačeny zelenou barvou. Jedná se konkrétně o jednotlivá měření při nastavení řezných parametrů na hodnoty :

$$n=224\text{ot.min}^{-1} ; v_c=129,13\text{ mm.s}^{-1} ; a_p=1,5\text{.ot}^{-1} ; f=0,1\text{mm}$$

Tyto naměřené hodnoty užitečného výkonu jsou přehledně zpracovány v následující tabulce 15.

Porovnání naměřených hodnot $P_{už}$ při shodných řezných podmínkách				Měřicí kufr		3-fázový analyzátor		Dynamometr Kistler						
Posuv	Hloubka řezu	Otáčky	Řezná rychlost	Střední hodnota	Interval	Střední hodnota	Interval	Střední hodnota		Interval	Měřená závislost			
$f[ot^{-1}]$	$a_p[mm]$	$n[ot.min^{-1}]$	$v[m.min^{-1}]$	$P_{už15}[W]$	$[W]$	$P_{už15}[W]$	$[W]$	$P_{už15}[W]$	$F_c[N]$	$[W]$	$P_{už}=f( )$			
0,1	1,5	224,00	129,13	837,33	±	10,55	±	27,65	846,82	393,47	±	11,16	$P_{už}=f(vc)$	
				891,33		26,70		943,93	28,78	861,45			16,76	$P_{už}=f(f)$
				890,67		28,22		926,87	28,29	854,14			19,15	$P_{už}=f(a_p)$
Podíl maximální a minimální hodnoty [%]				6,45 %		1,63 %		1,73 %						

**Tab. 15 – Hodnoty získané při shodných hodnotách během jednotlivých měření**

Z námi získaných hodnot nelze s jistotou určit, které metoda měření je nejpresnější, všechny 3 metody během měření sledovaly shodný trend změny velikosti užitečného výkonu v závislosti na jednotlivých nezávislých proměnných. Na základě hodnot intervalů spolehlivosti pro jednotlivé přístroje a na základě hodnocení průběhů hodnot naměřeného užitečného výkonu v kap. 4.6. lze pouze za nejméně přesné považovat měření pomocí měřicího kufru.

## 6. SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] GAZDA, J; aj. *Teorie obrábění: Řezné síly při obrábění*. 1. vyd. Liberec: Ediční středisko VŠST Liberec, 1993. 123 s. ISBN 80-7083-110-3.
- [2] KOČMAN, K., PROKOP, J. *Technologie obrábění*. 1. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, s. r. o., 2001. ISBN 80-214- 1996-2.
- [3] DRÁB, Vojtěch. *Technologie*. Liberec: Vysoká škola strojní a textilní v Liberci, 1979. ISBN-.
- [4] MÁDL, Jan. *Teorie obrábění*. Praha: ČVUT, 1989. ISBN-.
- [5] ČSN ISO 8688-1. *Řezné nástroje. Testování trvanlivosti při frézování*. únor 1993. Praha: Federální úřad pro normalizaci a měření.
- [6] *Technologie II*, 2díl.VŠB,[online]. Dostupné z [http://homel.vsb.cz/~cep77/PDF/skripta\\_Technologie\\_II\\_2dil.pdf](http://homel.vsb.cz/~cep77/PDF/skripta_Technologie_II_2dil.pdf)
- [7] DRÁB, V. *Technologie I: návody ke cvičení*. Vyd. 2., opr. Liberec: Vysoká škola strojní a textilní v Liberci, 1988. ISBN 80-7083-006-9.
- [8] *Pramet - Katalog* [online]. Dostupné z: [http://u12134.fsid.cvut.cz/podklady/\\_spolecne/katalog\\_nastroju\\_frezovani.pdf](http://u12134.fsid.cvut.cz/podklady/_spolecne/katalog_nastroju_frezovani.pdf)
- [9] *Katalog Stroje svoboda* [online] Dostupné z: <https://strojesvoboda.cz/2708>
- [10] *Kistler – prospekt*. Dostupné z: <https://www.kistler.com>



- [11] *Třířázový analyzátor výkonu DW-6092, LUTRON*. Technický list.  
Dostupné z: <https://eshop.micronics.cz/data/cz/att/002/3844-4525.pdf>
- [12] Nejman, D *Vliv vybraných technologických parametrů na užitečný výkon při frézování [Bakalářská práce]*. Liberec, Technická univerzita v Liberci. 2016
- [13] *Zdroje tepla a tepelná bilance* (učební text VSB). Dostupné z:  
[http://homel.vsb.cz/~cep77/PDF/EMO\\_kapitola\\_03.pdf](http://homel.vsb.cz/~cep77/PDF/EMO_kapitola_03.pdf)
- [14] Geistová, M. *Základy Výroby, Soustružení*. Ostrava: Střední průmyslová škola, Ostrava – Vítkovice, březen 2013. Dostupné na :  
<https://www.spszengrova.cz/texty/texty/ZAV/ZAV2-Soustružení-UT.pdf>